



## **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento del Territorio e dei sistemi Agro-Forestali  
**Corso di Laurea Triennale in Tecnologie Forestali e Ambientali**

Tesi di laurea triennale

### **EVOLUZIONE DEI GHIACCIAI ITALIANI NEGLI ULTIMI DUE SECOLI**

Relatore:

**Professor Andrea Marzoli**

Laureando:

**Simone Loro**

N° Matricola:

**2015349**

Anno accademico 2022/2023



# INDICE

ASTRATTO.....	5
1. INTRODUZIONE .....	7
2. MATERIALI E METODI.....	11
2.1 Area di Studio .....	11
2.2 Dati e Materiali.....	17
3. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	27
3.1 Risultati.....	27
3.2 Discussione e Conclusione .....	51
BIBLIOGRAFIA.....	55



## ASTRATTO

Viene presentata l'evoluzione dei ghiacciai italiani dal XIX° secolo al presente, cercando di comprendere quali siano i fenomeni che danno inizio alle dinamiche di scioglimento. Questa tesi si basa sullo studio di articoli preesistenti, i quali a loro volta sono stati scritti facendo uso di stazioni meteorologiche, georadar, GPS, carotaggi di ghiaccio, mappe ed archivi storici e test statistici.

Dalla fine della Piccola Era Glaciale (LIA) e l'inizio dell'era industriale, l'aumento delle temperature e la produzione di smog, e quindi l'alterazione dell'albedo, hanno portato col tempo ad una riduzione vertiginosa dei ghiacciai la cui superficie si è ritirata di circa il 60% della dimensione originale tra la LIA e gli anni 2000. Questa percentuale che si riferisce ai ghiacciai Alpini è simile a quelle registrate in altri studi in Europa.

Su Colle Gnifetti, una delle località studiate, l'accumulo di Nerofumo (BC) prima del 1850 era di 7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , mentre tra il 1850-1870 è stato di 14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , ovvero il doppio. Questo è solo un esempio di ciò che è successo lungo tutto l'arco alpino italiano.

I forzanti radiativi causati dall'accumulo di BC superficiali annuali dedotti aumentarono gradualmente a 13–17  $\text{W}/\text{m}^2$  tra il 1850 e il 1880, e raggiunsero valori superiori a 35  $\text{W}/\text{m}^2$  all'inizio del 1900.

Con lo scioglimento dei ghiacci, si nota un aumento del numero dei ghiacciai, ma una riduzione della loro superficie, indicando così una frammentazione di essi. Esempio di ciò è il complesso del Gran Paradiso, sul quale durante l'ultima fase del Pleistocene chiamata Egesen (circa 12-14 mila anni fa), erano presenti 73 ghiacciai in un'area di 240  $\text{Km}^2$ . Durante la LIA, la superficie si è ridotta a 104  $\text{Km}^2$  e 101 ghiacciai. Nel 2006 invece l'area restante era del 15% rispetto ad Egesen.

Tutti questi processi di scioglimento e riduzione dei ghiacciai causano delle instabilità nei ghiacciai stessi e sui versanti, portando rischi di eventi come crolli e valanghe, proprio come quello avvenuto sulla Marmolada il 3 luglio 2022, quando 64000 tonnellate di acqua, ghiaccio e roccia si sono staccate dal ghiacciaio, causando 11 morti e 7 feriti.



## 1. INTRODUZIONE

Questo studio vuole andare ad analizzare l'evoluzione e le dinamiche che i ghiacciai italiani hanno avuto nel tempo, concentrandosi specialmente nel periodo che inizia dal 19° secolo e continua fino ad oggi, indagando anche sulle possibili cause e conseguenze di queste dinamiche. Per fare ciò ci si è avvalsi di numerosi articoli scientifici riguardanti alcuni dei fenomeni e siti più importanti e rilevanti lungo l'arco alpino italiano.

I ghiacciai sono importantissimi indicatori delle condizioni ambientali e climatiche, ed è nel nostro maggiore interesse preservare queste strutture in quanto influenzano anche il clima stesso, attraverso meccanismi legati all'albedo (indice di riflettanza di una superficie), i limiti inferiori dei ghiacci, la copertura delle nevi ed i cicli dell'acqua con i bilanci di massa ad essi collegati.

Nel ghiaccio stesso sono registrate informazioni sia specifiche della località in cui si trovano i ghiacciai stessi, ma anche su scala globale, andando da precipitazioni (Schwikowski, M. 2010), depositi di sabbie desertiche e polveri vulcaniche, tracce di residui di armi radioattive (Oerlemans, J.;2009), depositi di smog fino alla presenza di microorganismi antichissimi (John D. Castello; 2005).

La scomparsa di questi veri e propri archivi sarebbe una grandissima perdita per il mondo scientifico.

I ghiacciai sono fondamentali per la ritenzione dei regimi idrici, in quanto immagazzinano per lunghi periodi l'acqua delle precipitazioni.

Con l'aumento delle temperature che stiamo osservando negli ultimi decenni, le precipitazioni sono principalmente di natura piovosa ed entrano immediatamente nei torrenti e nei fiumi (niente immagazzinamento), e solamente a quote elevate sono nevose, non riuscendo però a compensare la perdita della quantità di neve precipitata invece come pioggia. (report NCCS; 2021)

Ma già da molto tempo il ruolo di questi ghiacciai è compromesso dai cambiamenti climatici e per comprenderne al meglio l'intensità bisogna osservare ed analizzare

l'evoluzione che i ghiacciai hanno avuto nel corso del tempo, specialmente negli ultimi due secoli, cominciando dal diciannovesimo secolo, dove si registra l'inizio dell'incremento della temperatura media globale con il coincidere dell'inizio dell'era industriale.

Le variazioni dei ghiacciai sono sempre avvenute durante le ere geologiche e glaciologiche, ma solamente negli ultimi secoli sono stati osservati dei cambiamenti così intensi e veloci nelle masse glaciali.

L'ultimo grande avanzamento dei ghiacciai è avvenuto durante la fase finale del Pleistocene, ciò che da alcuni viene indicato con il nome Egesen (Carlo Baroni; 2021), avvenuto all'incirca 13 mila anni fa.

Dopo di esso, e durante la fase iniziale dell'Olocene (dalla fine dell'era glaciale al presente), si sono registrati aumenti delle temperature che poi sono rimaste all'incirca costanti fino al 19° secolo, seppur con alcune significative fluttuazioni. Una di queste è avvenuta a partire dal quattordicesimo secolo, quando si registrò un abbassamento delle temperature medie globali, portando ad una nuova espansione dei ghiacciai, i quali però non subirono una estensione pari a quelle avvenute durante Egesen.

Questo periodo prese il nome di Piccola Era Glaciale (Little Ice Age, abbreviata a LIA) e durò solamente circa 5 secoli, per poi finire bruscamente nel 19° secolo.

Durante questo periodo, il cambiamento climatico portò anche a dei cambiamenti nella mentalità e società umana. Già all'inizio della LIA (15° secolo), le improvvise variazioni del clima portarono ad una suscettibilità nella società riguardo a credenze popolari come la stregoneria e le streghe, le quali avrebbero avuto il potere di alterare le condizioni meteorologiche. In poco tempo queste ideologie fecero esplodere delle vere e proprie "caccia alle streghe" in tutta Europa (Behringer, W; 1999).

Molto più differente fu l'approccio che la società ebbe nel 17° secolo, dove le persone sembrarono convivere con le situazioni climatiche avverse, nonostante i problemi che il clima ebbe sull'agricoltura, fino ad organizzare delle "Fiere del Gelo" (*Frost Fairs* in inglese) sulla superficie ghiacciata dei grandi fiumi (Mike Lockwood et al.; 2017).

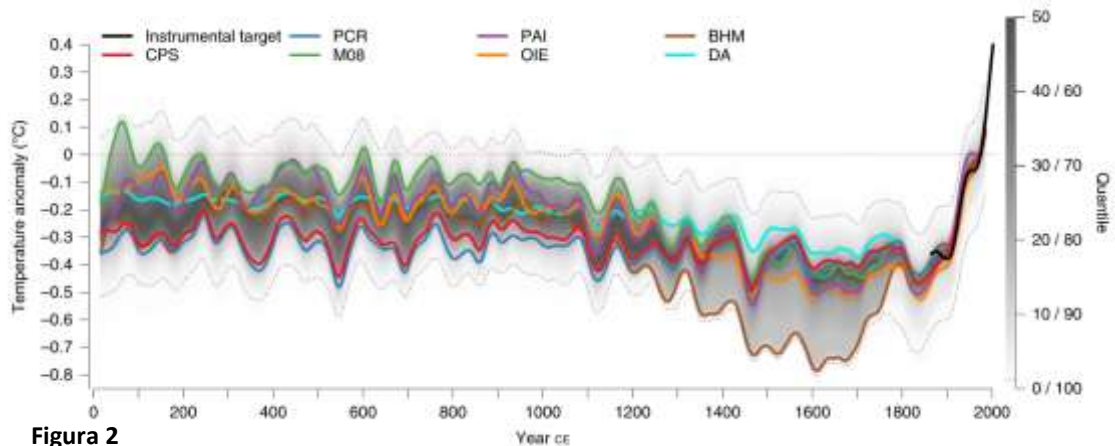




**Figura 1**

*"Frost Fair on the River Thames near the Temple Stairs"* – Thomas Wyke 1683/1684

Con l'abbassamento delle temperature, ed inverni con una durata maggiore, il congelamento dei grandi fiumi europei non era un evento raro, anzi, diventò durante il 17° secolo un evento seguito da fiere, come la Frost Fair sul Tamigi.



**Figura 2**

(Neukom R et al. 2019)

Ricostruzione dell'andamento delle temperature medie globali negli ultimi 2000 anni.

Ciascuna linea colorata raffigura un diverso metodo statistico utilizzato (in totale 7).

La linea nera raffigura i dati strumentali raccolti direttamente.

L'andamento viene mediato su di un intervallo di 30 anni.

Prima dell'era dell' industrializzazione, l'aumento delle temperature non era così significativo da causare la ritirata dei ghiacciai, e le precipitazioni erano perlopiù invariate. Solo dopo l'inizio dell'era industriale si è avuto un notevole aumento delle temperature globali.

Verso la fine del 19° secolo, cominciarono i lavori per la costruzione di linee ferroviarie lungo l'arco alpino, introducendo così il "Nerofumo" (Black Coal, BC, vedi "materiali e metodi" pag.19-20) sulle Alpi tramite la combustione del carburante delle locomotive, le quali erano la seconda fonte di emissione di BC dell'epoca, subito dopo le industrie.

Prima dell'era industriale, le emissioni di BC erano legate solamente ad occasionali incendi boschivi locali oppure ad eruzioni vulcaniche, mentre con l'avvento dell'industria e delle fonti di energia a combustione, la produzione ed emissione di BC si è intensificata e resa costante nel tempo.

Oggi il deposito di BC è ancora uno dei maggiori riscaldatori climatici, classificabile al terzo posto dopo metano ed anidride carbonica.

Benché il nerofumo in atmosfera non abbia una forzante climatica intensa quanto il  $\text{CH}_4$  e la  $\text{CO}_2$ , e con una durata nell'aria molto breve (Smith, SJ; 2020), una volta depositata su di una superficie, BC la oscura con uno strato di smog e fuliggine. Durante il 19° secolo, le superfici interessate erano i ghiacci e le nevi dei ghiacciai europei.

La deposizione di questo materiale sul ghiaccio porta ad una variazione dell'albedo, ovvero l'indice di rifrazione: più chiara è una superficie, più essa rifletterà la radiazione solare, senza assorbirla e di conseguenza senza provocarne il riscaldamento. Ma il deposito di BC riesce ad assorbire la radiazione solare anche a basse concentrazioni, portando ad un oscuramento della superficie, e quindi ad un aumento delle temperature superficiali.

Ciò che rende davvero pericoloso l'abbassamento di albedo è il fenomeno che ne consegue, chiamato retroazione positiva: ovvero quando i risultati di un sistema vanno ad amplificare il funzionamento del sistema stesso. In questo caso l'abbassamento dell'albedo porta alla riduzione della superficie riflettente, la quale porta ad un ulteriore riduzione dell'albedo stesso, aggravandone così l'effetto.

Questo scioglimento dei ghiacci porta a delle instabilità nella struttura dei ghiacciai, delle loro morene adiacenti e dei versanti su cui posano. Nel lungo periodo, crolli e degradamenti sono causati da processi di erosione, ma nel breve periodo possono essere causati dall'azione diretta che l'acqua ha sulle masse glaciali e rocciose, per esempio una pressione idrica che viene esercitata tra uno strato ghiacciato ed uno roccioso sottostante.

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1 Area di Studio

I ghiacciai delle Alpi si distribuiscono lungo tutta la fascia montana alpina, tipicamente si trovano a ridosso di montagne alte più di 4000 metri s.l.m. ma anche addossati alle montagne che superano i 3000 m s.l.m..

Per questo studio si è andati a considerare una serie di siti campione distribuiti lungo tutto l'arco alpino. I siti "principali" fanno parte delle Alpi Italiane, mentre altri siti hanno la funzione di rappresentare gli effetti di fenomeni che interessano tutto l'arco montano, sia quello italiano che quello estero.

**Figura 3.a-b**

Posizione sulle alpi dei siti principali considerati per questo studio.

I punti grandi azzurri indicano i siti in cui sono stati misurati i cambiamenti dei ghiacciai.

I punti piccoli blu indicano i siti utilizzati per spiegare i fenomeni quali l'albedo e la deposizione di Nerofumo.



- Ghiacciaio della Marmolada ( $46^{\circ}26'32''$  N,  $11^{\circ}51'53''$  E), sulla parte settentrionale del massiccio della Marmolada, posto a confine tra la provincia di Trento e la provincia di Belluno ad una altitudine che va da 2700 m s.l.m. fino ad arrivare ai 3300 m s.l.m..

La vetta più alta è chiamata Punta Penia, a 3343 m s.l.m.



**Figura 4**

Vista tridimensionale del massiccio della Marmolada, creata proiettando un'immagine del massiccio su di un Modello digitale di elevazione utilizzando un LiDar. (I. Santin et al.2023)

Nel 1962 si è registrato che il ghiacciaio principale si divideva in 8 unità glaciali. Nel corso del tempo queste unità glaciali si sono divise e scomparse, mentre poi nell'inventario del 2015 il numero è stato definito a 7 unità, con una estensione del fronte di circa 3 Km.

Se controlliamo le misure dirette e mappe storiche del 1888, possiamo definire che il ghiacciaio si estendeva su di una area di 4,28 Km<sup>2</sup>, mentre nel 2015 la superficie si è ridotta del 66%, coprendo solamente 1,48 Km<sup>2</sup> (I. Santin et al. 2019).

Dal 1971 al 2015, si è misurato un ritiro del fronte di 650 metri nella parte centrale, per poi avere un ritiro annuale di 30 metri a partire dall'inizio del 2000.

- Vadret da Morteratsch nelle Alpi svizzere (46°24' N, 9°56' E), è un ghiacciaio che si estende con una lunghezza di 7,5 Km e copre un'area di circa 17 Km<sup>2</sup>.

Il ghiacciaio presenta una zona di accumulo ad una altitudine di 2477 m slm, per poi scendere fino a circa 2000 m slm.

**Figura 5**  
immagine di Vadret da  
Morteratsch



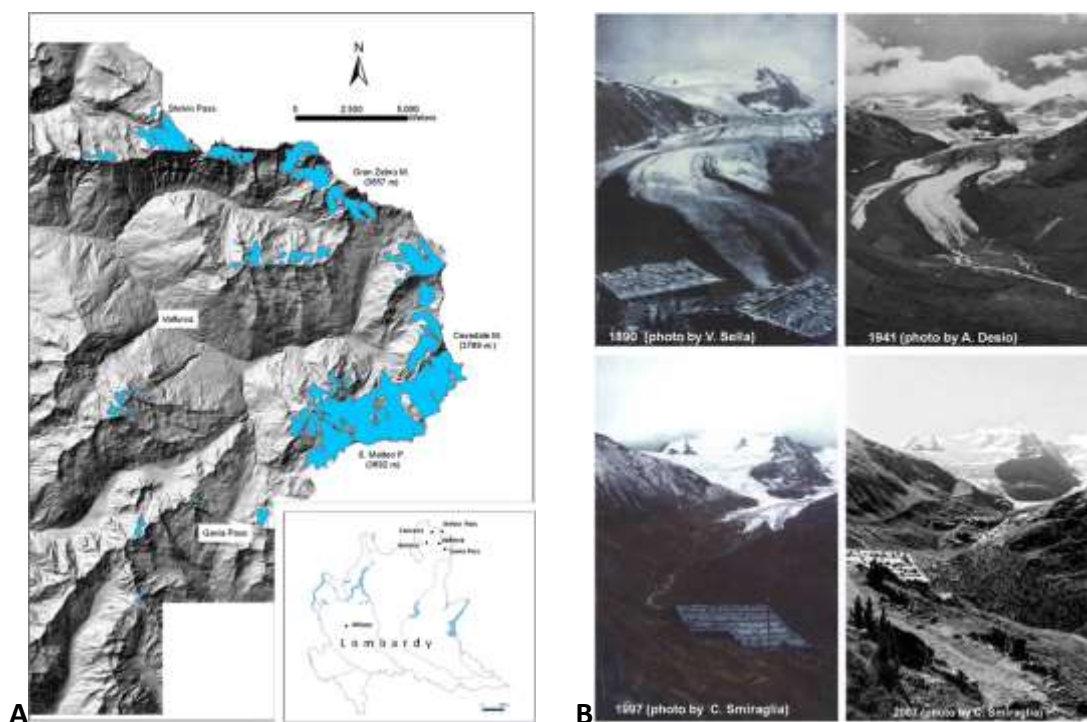
- Il Parco Nazionale dello Stelvio, sulle alpi italiane tra le regioni della Lombardia e del Trentino Alto Adige, si estende sul territorio lombardo con una superficie di 600 Km<sup>2</sup>. Qui sono presenti numerosi complessi di ghiacciai molto importanti, come il complesso dei Forni (2,600–3,670 m s.l.m. 46°23'53.52"N 10°35'17.16"E), il più importante con una estensione di 12 Km<sup>2</sup>.

Questo complesso è fondamentale in quanto su di esso sono stati eseguiti molti studi, tra cui mappature e datazioni di creste moreniche ben conservate, descrivendo sviluppo e caratteristiche della morfologia epiglaciale. Un altro ghiacciaio studiato è

quello di Sforzellina (2 850–3 360 m s.l.m. 46°20'48.81"N 10°30'53.3"E), un ghiacciaio montano.

I dati ottenuti dal Primo Inventario dei Ghiacciai Italiani dimostrano la presenza di 113 Ghiacciai su tutto il Parco dello Stelvio, distribuendosi su diverse regioni: in Lombardia 42 (39%), in Alto Adige 50 (43%) e in Trentino 21 (18%). I ghiacciai qui analizzati sono quelli situati in Lombardia.

Le cime principali sono quelle di Ortles (3905 m slm 46°30'38.02"N 10°32'30.98"E) e Cevedale (3769 m slm 46°26'53"N 10°37'15"E), insieme ad altre cime come quelle di San Matteo, Gran Zebrù, il Corno dei Tre Signori e Punta Thurwieser.



**Figura 6.a-b**

(A) Superficie del ghiacciaio di Ortles – Cevedale.

(B) Evoluzione del ghiacciaio durante il 1890-1941 -1997 – 2007.

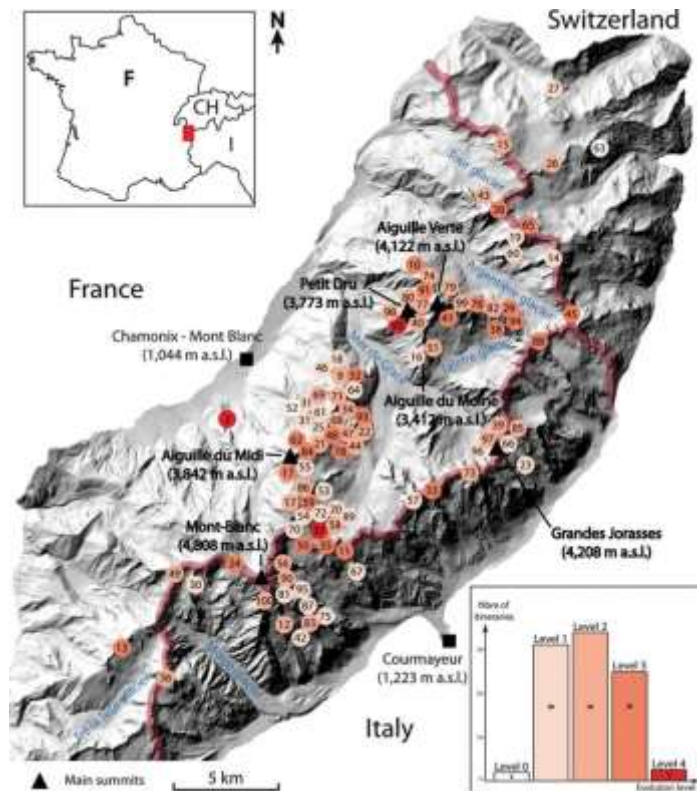
(D'Agata, C. et al. 2014)



- Il Massiccio del Monte Bianco, con i suoi ghiacciai, ospita l'omonima montagna più alta d'Europa che con i suoi 4807 metri sul livello del mare, si estende tra Italia, Francia e Svizzera (45°49'58"N 6°51'54"E) con una lunghezza di 40 Km e una larghezza che varia da 8 a 15 Km, occupando così una superficie di circa 650 Km<sup>2</sup>.

I ghiacciai e località che sono state analizzate in questo studio sono:

- Chamonix (1044 m slm)
- Courmayeur (1233 m slm)
- Aiguille du Midi (3842 m slm)
- Ghiacciaio dell' Argentiere (circa 1900 m slm)
- Mer de Glace (1913 m slm)
- Ghiacciaio del Gigante (vicino alla vetta del Dente del Gigante a 4014 m slm)



**Figura 7**

Estensione del Massiccio del Monte Bianco e dei suoi ghiacciai e località. (Jacques Mourey et al.2019)

Vengono segnati anche i percorsi alpini presenti sul monte, divisi per livelli (Livello 1,2,3,4)

Per via dello scioglimento dei ghiacci alcuni di questi sono scomparsi ed altri sono a rischio di scomparire

- Colle Gnifetti (Monte Rosa, coordinate carotaggi CG03 e CG05: 4450 m s.l.m., 45° 55' 55" N; 07 ° 52'34") con un'area di circa 40 km<sup>2</sup>, si estende dai 2190 fino ai 4600 metri sul livello del mare. A fronte della sua estensione, nel 2017 è stato calcolato un volume di circa 4.9 Km<sup>3</sup>.

Dalla metà dell'800, il ghiacciaio ha perso circa il 40% della sua area, a seguito di un ritiro della sua fronte pari a circa 3,3 chilometri.

Importante è la posizione in cui Michael Sigl et al. hanno eseguito l'estrazione delle carote CG03 e CG05 per poter analizzare il materiale contenuto nel ghiaccio e datarlo, in quanto qui sono presenti bassi tassi di accumulo netto annuale, permettendo così di accedere a strati

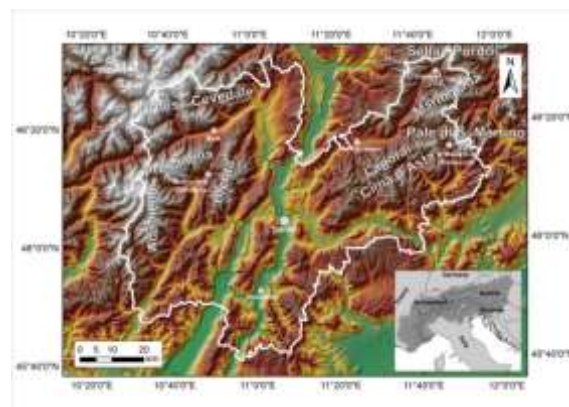


**Figura 8** Immagine di Colle Gnifetti.

più antichi senza dover estrarre carote di lunghe dimensioni. Da precisare

che, nonostante i bassi tassi di accumulo, in questa posizione si riesce a percepire e misurare gli effetti delle attività antropiche, ciò rende questo sito di estrazione perfetto per la raccolta dei dati.

- La Provincia di Trento, coprendo un'area di 6260 Km<sup>2</sup>, include nel suo territorio numerosi ghiacciai, come quello dell'Ortles-Cevedale, l'Adamello, la Marmolada e del Lagorai. Essendo oltre il 70% del territorio al di sopra dei 1000 metri slm, il clima qui presente è tipicamente Oceanico, mentre nelle valli più interne è continentale (Zanoner et al. 2017).



**Figura 10**

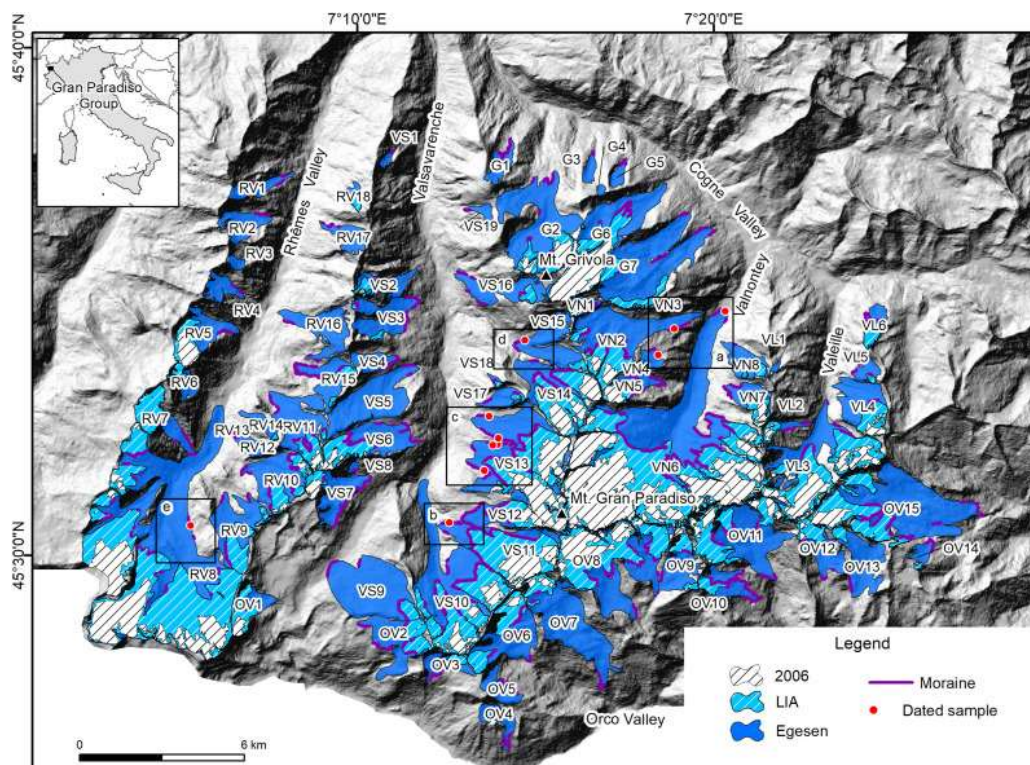
Estensione del territorio del Trentino ed i ghiacciai inclusi all'interno di esso. (Zanoner et al. 2017).

● I Ghiacciai del gruppo del Gran Paradiso (45° 25' - 45° 39' N e 7° 02' - 7° 28' E) sono a cavallo tra il Piemonte e la Valle d'Aosta, facendo così parte delle Alpi Nord-Occidentali.

Durante il Pleistocene, più precisamente durante l'ultima fase di avanzamento dei ghiacciai detta Egesen all'circa 12,9 ka (migliaia di anni fa) (Carlo Baroni et al. 2021), il gruppo del Gran Paradiso faceva parte del complesso dei ghiacciai vallivi della Dora Baltea, che si estendeva per 120 Km dal Monte Bianco fino al margine superiore della Pianura Padana. Tutto il complesso alimentava l'Anfiteatro morenico di Ivrea.

Il ritiro della Dora Baltea avvenne tra  $23,8 \pm 1,7$  Ka e  $20,1 \pm 3,0$  Ka.

Durante la Piccola Era Glaciale (LIA) il massiccio è ancora tra le zone più ghiacciate delle Alpi Nord-Occidentali., con 72 ghiacciai ed una estensione totale di 37 Km<sup>2</sup>.



**Figura 9**

Estensione dei ghiacciai del Gran Paradiso nei vari periodi.

In blu durante Egesen.

In azzurro durante LIA

In bianco con strisce durante il 2006.

Sono indicate anche le morene ed i siti in cui sono avvenute le analisi.

(Carlo Baroni et al. 2021)



## 2.2 Dati e Materiali

Per la scrittura di questa ricerca sono stati utilizzati dati appartenenti ad altri articoli scientifici.

A loro volta, questi articoli sono stati scritti basandosi su dati ottenuti da diversi strumenti di misurazione, modelli matematici e statistici, dei quali si cercherà di spiegarne il funzionamento ed i concetti su cui si basano.

### GPR

Il Geo Penetrating Radar (GPR o Georadar) è un metodo non invasivo utilizzato in geofisica, che si basa sull'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche (EM) trasmesse attraverso il terreno e sulle proprietà elettromagnetiche dei materiali che vengono attraversati, acquisendo immagini ad alta risoluzione del sottosuolo.

La densità e struttura dei materiali influenza i valori EM come la conduttività elettrica e la permeabilità dielettrica (ovvero la tendenza di un corpo a respingere un campo elettrico), portando così ad una variazione nella velocità delle onde elettromagnetiche.

Il ghiaccio puro si presenta come trasparente alle onde.

L'acqua presente nel ghiaccio (come presente nella Marmolada) causa dispersioni portando a delle diffrazioni osservabili lungo il profilo del Georadar.

Di norma il processo di analisi con il GPR viene effettuato con 2 antenne accoppiate al suolo.

Per le ricerche sul Ghiacciaio della Marmolada sono state eseguite 2 misurazioni da I. Santin et al.:

- Nel 2005, sono state impiegati 2 sistemi, uno con un PulseEKKO 4 monostatico dotato di antenna da 100 MHz e l'altro con due antenne con frequenze di 35 MHz.
- Nel 2014 è stato invece utilizzato un solo sistema aereo composto da una antenna singola, montata a bordo di un elicottero.

Per la ricerca riguardante il crollo di una porzione del ghiacciaio della Marmolada, avvenuto il 3 luglio del 2022, sono stati utilizzati da Aldino Bondesan et al. (2023):

- 19 Carte Topografiche, 27 serie di immagini satellitari, 4 rilievi laser.

- Dati derivati da campagne glaciologiche annuali: 1902–1906; 1925-1938; 1951–1966; e 1972–2021
- Temperature medie annuali e mensili da una stazione metereologica PRC posta sul ghiacciaio poco distante da Punta Rocca.
- Velocità di Fusione viene ottenuta con il modello “Gradi-Giorno” ovvero la somma, estesa a tutti i giorni dell'anno, della differenza (solo quella positiva) tra la temperatura dell'ambiente interno e la temperatura media esterna giornaliera; adottando successivamente il Modello HBV-D, una simulazione computerizzata di un modello matematico utilizzato tipicamente per analizzare i flussi d’acqua, ma tra le sue funzioni permette di comprendere anche la radiazione solare a onde corte di input e quella riflessa dall’effetto albedo sulla neve e sulle superfici dei ghiacciai.

### **AWS**

La Stazione Metereologica Automatica (AWS) è la versione automatizzata della Stazione Metereologica, e permette il controllo remoto della macchina per le misurazioni in aree remote.

Grazie ad un grande numero di sensori e strumenti di misurazione, la stazione può immagazzinare ed elaborare dati. In questo caso ha misurato: la temperatura dell’aria, la pressione atmosferica, velocità e direzione del vento, umidità, radiazione ad onde corte (in entrata e riflessa) e radiazione ad onde lunghe (in entrata ed uscita).

La stazione è stata operativa dal 1° ottobre 1995 fino al 15 maggio 2007, è posizionata ad una altitudine di 2115 metri slm, su una superficie con pendenza vicina a 5°.



**Figura 11**  
Stazione AWS sul Vadret da Morteratsch

L'altezza dei sensori dalla superficie è di 3,5 m; con la radiazione riflessa che proviene da un raggio effettivo di 10 metri. La stazione copre così un'area complessiva di 300 metri quadrati.

La macchina esegue un campionamento ogni minuto, per poi eseguire una media ogni 30 minuti; così per un periodo di 12 anni, con solo 20 giorni di dati assenti.

### **Sonic Ranger**

Il Sonic Ranger è uno strumento capace di misurare le distanze attraverso l'utilizzo di ultrasuoni.

La coordinata tracciata è la distanza dalla portata:  $1/2$  la velocità del suono divisa per il tempo necessario tra la generazione di un clic e l'ascolto di un'eco.

### **Depositi di Nero Fumo ("Black Coal")**

Con il termine "Nero fumo" (BC) si indica la deposizione di smog e carbone sotto forma di sottili polveri. Si origina dalla combustione incompleta di biomassa naturale (ad esempio incendi boschivi) o dalla combustione di biocarburanti e combustibili fossili utilizzati durante le attività antropiche.

Questo strato di fuliggine è importantissimo in quanto è insolubile, refrattario, può assorbire la radiazione solare anche a bassissime concentrazioni ed è capace di aggregarsi formando delle piccole strutture sferiche di carbonio.

Nello studio di Michael Sigl et al., sono state estratte nel 2003 due carote, colonne di un substrato (di solito terreno e roccia, in questo caso ghiaccio) provenienti da Colle Gnifetti (Monte Rosa, 4450 m s.l.m., 45° 55' 55" N; 07 ° 52'34") denominate CG03A e CG03B, lunghe entrambe 82 m.

Altre carote sono state raccolte nel 2008 e 2015 nella stessa zona per aggiornare i dati ottenuti precedentemente.

Le concentrazioni di BC sono state determinate attraverso l'utilizzo di un fotometro di fuliggine a particella singola e un nebulizzatore a getto per aerosolizzare i campioni acquosi.

I capillari per nebulizzare vengono lavati una volta al giorno con acido nitrico 3% per 10 minuti.

I campioni sono stati sciolti a temperatura ambiente e preservati in fiale di propilene, per poi essere elaborati per 25 minuti e subito dopo analizzati con un campionatore automatico.

Già solamente dalla carota CG03B è possibile analizzare che i primi 57,2 m contengono 1635 campioni che risalgono anche prima dell'era preindustriale.

Sono state eseguite 387 analisi di replica tra le sezioni parallele delle due carote (20% della lunghezza delle analisi originali).

Stesso metodo è stato utilizzato per i campioni di CG15 sugli 11,9 m superiori, con 276 campioni totali.

La cromatografia ionica e la spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente sono stati altri metodi fondamentali per consentire la datazione dei campioni, in base alle concentrazioni degli ioni principali trovati all'interno del ghiaccio.

Per eseguire una datazione più accurata tra CG03A e CG03B, è stata adottata una interpolazione lineare, ovvero una rappresentazione sintetica di una relazione funzionale tra due (o più) variabili statistiche, portando così a paragone dei punti di collegamento.

Sono stati stabiliti così ben 221 collegamenti di registrazione stratigrafica tra il 1741 e il 2003, un numero prossimo al numero originale di strati individuati in CG03A.

La cronologia dei campioni di CG03A è stata effettuata principalmente attraverso il metodo degli ioni di  $\text{NH}_4^+$ , oltre che con la datazione del  $^{14}\text{C}$  per le sezioni più profonde e con indicatori di età assoluti, come eruzioni vulcaniche datate, record storici di tempeste di polvere provenienti dal Sahara e test di armi nucleari.

### **Dati Glaciologici**

Sono stati effettuati 5 rilevamenti su ghiacciai superficiali (D'Agata, C. et al. 2014), risalenti rispettivamente agli anni 1954, 1981, 1990, 2003 e 2007.

Durante le indagini sul campo è stato fatto uso del DGPS (Differential Global Positioning System) un sistema che trasmette segnali corretti su equipaggiamento di navigazione GPS mobile. Questo servizio migliora l'accuratezza della posizione e migliora la qualità del segnale.

L'elaborazione dei dati ottenuti è stata eseguita con il programma di Geographic Information System (GIS), con una carta tecnica regionale di 1:10000 come raster di base.

Nel 2003 e 2007 sono state raccolte delle ortofoto, ovvero delle composizioni di fotogrammi ortorettificati e georeferenziati, recuperabili direttamente dalla GDR e con una risoluzione di 1 pixel equivalente a 0,5 metri (precisione planimetrica  $\pm 1\text{m}$ ).

Le ortofoto 1954-1981 sono state ottenute invece da foto aeree con una precisione di  $\pm 5\text{m}$ .

La nitidezza dei limiti dei ghiacciai è stata verificata attraverso una tamponatura (ovvero il processo per individuare dove finisce il ghiaccio e dove inizia la neve) del perimetro del ghiacciaio, successivamente è stata utilizzata questa formula per definire la precisione finale.

$$\text{Precisione finale} = \sqrt{(A_{t1} + A_{t2} + \dots + A_{tn})^2}$$

### **Dati Metereologici**

Per la raccolta dei dati metereologici è stata utilizzata da D'Agata, C. et al. la stazione meteo della città più vicina di Bormio (1225 m slm) a 20 Km di distanza dal ghiacciaio, la quale ha registrato le Temperature Stagionali ed Annuali T ( $^{\circ}\text{C}$ ) e le Precipitazioni giornaliere totali P (mm).

La profondità del manto nevoso Hs (m) è derivata dalla profondità osservata e ricavata dal vicino manto nevoso del Monte Cancano (1950 m slm) (D'Agata, C. et al. 2014).

## **Test Statistici**

Per l'analisi dei dati, sono stati utilizzati 2 tipi di test statistici: LR e MK (tradizionale e progressivo).

Tra questi, il test MK è un test non parametrico, ovvero meno sensibile ai valori estremi, e serve per valutare le tendenze significative delle serie temporali idrometeorologiche, ovvero giudica la non-stazionarietà della serie. In caso MK trovi un comportamento non stazionario, verrà individuato il punto di partenza della tendenza. Sia per MK che per LR, il valore della soglia di significatività ( $p$ ) risulta significativo per entrambi se  $p < 0,05$ .

Questi test sono stati utilizzati per trovare una correlazione tra i dati meteorologici locali della zona del ghiacciaio Ortles-Cevedale e l'oscillazione del nord Atlantico (alterazione su larga scala delle masse atmosferiche tra zone subtropicali di alta pressione e le zone di bassa pressione polari) (A. John 2001), o meglio le anomalie climatiche avvenute nel periodo tra il 1951 ed il 2007, al fine di valutare un possibile collegamento tra la circolazione generale climatica e le variabili climatiche locali.

Successivamente si è testato se il riscaldamento globale ha avuto una presenza sulle dinamiche del sito interessato, andando così a cercare una correlazione tra le anomalie di temperatura globale e le temperature di due complessi di ghiacciai: lo Sforzellina e i Forni.

Le correlazioni sono state eseguite anche per tutte le stagioni dell'anno (ad eccezione dei periodi durante i quali sono avvenute nevicate estive). La finestra temporale considerata è stata di 10 anni, in modo da poter considerare la presenza a lungo termine degli effetti climatici.

## **Complesso del Gran Paradiso**

Per il rilievo e la mappatura del campo sono state utilizzate mappe storiche (come quelle es. Sacco, 1925 , 1921a , 1921b ; Beschel 1958), foto di interpolazione e dati LiDar. Ma i dati più importanti sono stati ottenuti attraverso l'analisi dei sedimenti glaciali, limiti della deriva glaciale, morfologie erose (fino a 2 cm di erosione) e

deposizioni, rendendo le morene passate facilmente identificabili e mappabili. Il grado di conservazione ed erosione permette di distinguere le dinamiche glaciali avvenute durante Egesen da quelle avvenute durante LIA, nella quale i massi erratici tipicamente non vengono alterati dall'azione meccanica del ghiaccio, oppure l'alterazione è minima.

Inoltre i suoli formati durante la LIA sono solitamente sottili da 5 a 20 cm e poco sviluppati.

Altro fondamentale elemento per lo studio è la datazione dei "massi erratici", ovvero corpi rocciosi che sono stati spostati dalla loro sede originaria attraverso l'azione meccanica dell'avanzamento dei ghiacciai. I massi presi in considerazione sono stati quelli meglio conservati provenienti da siti chiave, preferendo quelli di grandi dimensioni a base larga. Vengono esclusi dalla selezione quelli che presentano segni di disturbi derivati da azioni gravitazionali e di instabilità (cadute e frane).

La datazione di questi massi viene effettuata tramite l'utilizzo di nucleotidi cosmogenici, in questo caso è stato utilizzato il <sup>10</sup>Berilio (<sup>10</sup>Be), il quale ha un tempo di decadimento pari a  $1,39 \cdot 10^6$  anni.

La preparazione dei campioni di nucleotidi è stata eseguita utilizzando il quarzo come minerale target. Ovviamente il quarzo è proveniente dai massi erratici.

I rapporti <sup>10</sup>Be/<sup>9</sup>Be sono stati misurati con uno spettrometro di massa (Acceleratore Tandy 600 Kv), il quale ha restituito dei risultati di questi rapporti, normalizzati rispetto agli standard interni dell'ETH di Zurigo S2007N e S2010, pari a  $28,1 \cdot 10^{-12}$  e  $3,3 \cdot 10^{-12}$ .

L' Altitudine della Linea di Equilibrio (ELA) rappresenta la quota alla quale si separa la zona di accumulo di un ghiacciaio. I dati relativi ad essa sono stati ottenuti attraverso due metodi: Il rapporto di area di accumulo (AAR) ed il rapporto di equilibrio area-altitudine (AABR) il quale tiene conto dell'ipsometria dei ghiacci e dei gradienti di bilancio di massa.

AABR risulta essere più affidabile di AAR, ma quest'ultimo viene utilizzato sino dal 1970 per lo studio dei paleoghiacciai, di conseguenza sono stati utilizzati entrambi.

Gli ELA sono stati calcolati utilizzando un  $AAR_{\text{vallivo}} = 0,67 \pm 0,05$  ; un  $AAR_{\text{circo}} = 0,5 \pm 0,05$  e per AABR è stato applicato un rapporto di bilancio =  $1,59 \pm 0,6$ .

Per quanto riguarda i mezzi di calcolo, i dati di ELA sono stati ottenuti con ArcGIS basati sul linguaggio informatico di Python, il quale ha permesso il calcolo diretto di AAR-ELA e AABR-ELA.

La differenza tra ELA di Egesen e quella riferita a LIA, ci restituisce  $\Delta ELA$ , fondamentale per ricostruire la precipitazione e le temperature passate.

La variazione di temperatura è stata calcolata assumendo che le quantità di precipitazioni passate siano simili a quelle attuali e con un tasso medio standard di  $0,65^\circ\text{C}/100\text{m}$ . Era stato considerato di usare anche un tasso di  $0,6-0,8/100\text{m}$ , ma i risultati  $ELA_{\text{Egesen}}$  restituivano risultati negativi.

Le precipitazioni sono state ricavate da due formule:

Approssimazione quadratica:  $P_{\text{ann}} = 5,87T^2 + 230T + 966$

Approssimazione Lineare:  $P_{\text{ann}} = 264,1T + 957$

Le variazioni di Volume sono state calcolate con il confronto di modelli di elevazione riguardanti i diversi periodi temporali considerati (Egesen, LIA, 2006)

$$\Delta V = \Delta z \cdot A_{\text{max}}$$

Dove  $A_{\text{max}}$  è l'area più estesa registrata tra  $t_1$  e  $t_2$ ; mentre  $\Delta z$  è la variazione media di elevazione tra  $t_1$  e  $t_2$ .

Infine, per calcolare il bilancio di Massa:

$$M = \frac{(\Delta V \cdot \rho) / \bar{A}}{\Delta T}$$

Dove  $\rho$  è la densità del ghiacciaio ( $850 \pm 60 \text{ Kg/m}^3$ ),  $\bar{A}$  l'area media tra  $t_1$  e  $t_2$  ed infine  $\Delta t$  intervallo di tempo in anni tra  $t_1$  e  $t_2$ .



## **LIA e rischi geologici in Trentino**

Zanoner et al. (2017) hanno utilizzato per i loro studi tecniche di telerilevamento, informazioni provenienti dagli archivi e lavori precedentemente pubblicati. Ma tra i materiali più importanti possiamo trovare i censimenti LIA ed i censimenti Post-LIA. Il riconoscimento, o meglio il differenziamento, tra i due è molto difficile con le tecniche di telerilevamento, ecco perché i record catastali sono di grande importanza.

La ricostruzione dei depositi LIA e Post sono stati fatti usando mappe derivate da modelli digitali LiDar del 2006-2007, insieme ad ortofoto digitali scattate alla fine delle estati dal 2000 al 2006.

Cruciale è l'identificazione delle creste moreniche di LIA, le quali presentano caratteristiche tipiche come creste affilate, fianchi rapidi ed assenza di vegetazione.



### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 Risultati

##### Evoluzione Marmolada

Nel 2015 è stato misurato uno spessore medio del ghiaccio pari a 12,9 m ed uno spessore massimo di 40 m.

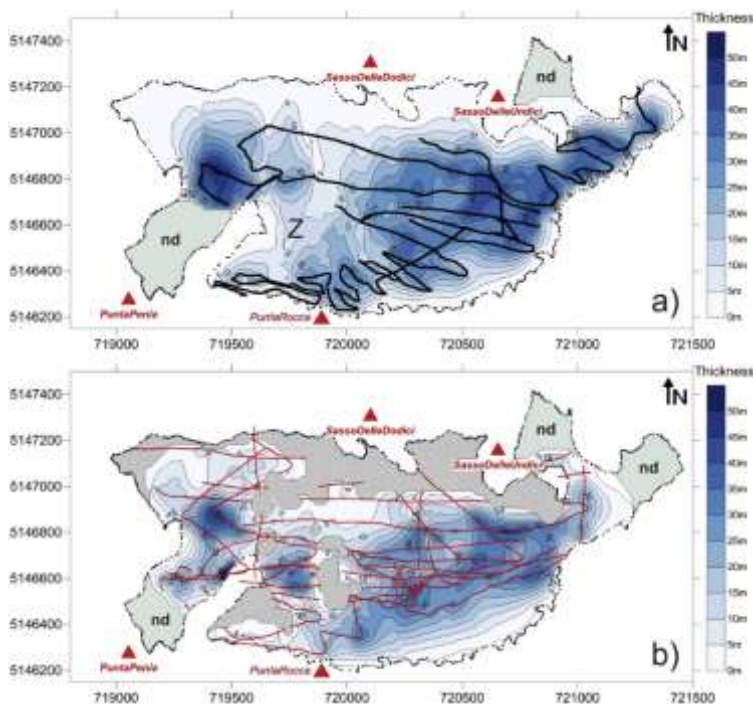
Ciò ha portato a dei cambiamenti nella struttura del ghiacciaio, con una variazione tra il 2004 ed il 2015 dello spessore medio di 5 m, in alcune zone della parte orientale la diminuzione è di 25 metri.

C'è da specificare che i dati raccolti da Santin et al. nel 2015 si riferiscono all'anno glaciologico del 2014. Questo per poter analizzare una finestra temporale di 10 anni.

	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
2004	1400000	25267000
2015	1090000	17499000
Variazione	-22%	-30%

**Tabella 1**

Variazione della superficie e volume del ghiaccio nel 2004 e 2015, con anche variazione espressa in percentuale.



**Figura 12.a-b**

Mappe rappresentanti lo spessore del ghiaccio nel 2004 (a) e 2015 (b).

(Santin et al. 2019)

Le linee rosse e nere rappresentano le posizioni dei profili GPR.

Le zone con la scritta "nd" sono zone prive di dati raccolti. Invece la zona in (a) con la lettera "Z" è una zona con uno scarso numero di dati, portando ad uno spessore basso ed irrealistico.

## **Disastro della Marmolada**

Avvenuto il 3 Luglio 2022 alle 13:43:20 CEST (11:43:20 UTC) ad una distanza di circa 600 metri ad Ovest della vetta di Picco Penia (3343 m s.l.m.).

Il distacco ha interessato una piccola unità glaciale con un confine irregolare riconducibile ad una estensione di 160 m di larghezza per 140 m di lunghezza ed una pendenza di 30°. Queste erano le misure poco prima del momento del crollo.

Si stima che il crollo abbia riversato 64000 tonnellate di acqua, ghiaccio e detriti lungo il versante.

Dopo l'evento la parete ghiacciata presenta una altezza di 23 m, una scarpata di 109 m con una corda di 75 m.

La parte della parete che ha costituito il crollo presenta una forma rettangolare di 65-70 m per 85-90 m, con un volume totale di materiale corrispondente a 70.400 m<sup>3</sup>.

Il flusso ha avuto una velocità iniziale di 80 Km/h fino a 1,4 Km dal punto di inizio, per poi decelerare fino a 50 Km/h a 1,8 Km; percorrendo in totale 2,3 Km prima di arrestarsi ad una quota di 2330 m s.l.m.

Le temperature medie annue del 2022 sono state messe a confronto con le temperature medie del decennio 1990-2000, ottenendo i seguenti risultati:

- T° Massima media 2022 (Tmax) = -0,4°C (+1,9°C rispetto alla media 1990-2000)

- T° Media 2022 (Tm) = -3,2°C (+1,8°C rispetto alla media 1990-2000)

- T° Minima media 2022 (Tmin) = -5,8°C (+1,9°C rispetto alla media 1990-2000)

Pertanto l'aumento totale delle temperature medie annuali negli ultimi 30 anni sulla Marmolada è di +1,0°C (Tmax), +1,6°C (Tm) e +2,0°C (Tmin), con un corrispettivo aumento medio di:

Tmax = +0,67°C; Tm = +0,54°C e Tmin = +0,32°C gradi per decennio.

Questi valori si dimostrano molto al di sopra dei tassi medi di aumento delle temperature globali di +0,18°C a decennio stimati dal 1981.

Le temperature medie registrate nei due mesi precedenti al crollo hanno dimostrato un aumento mensile:

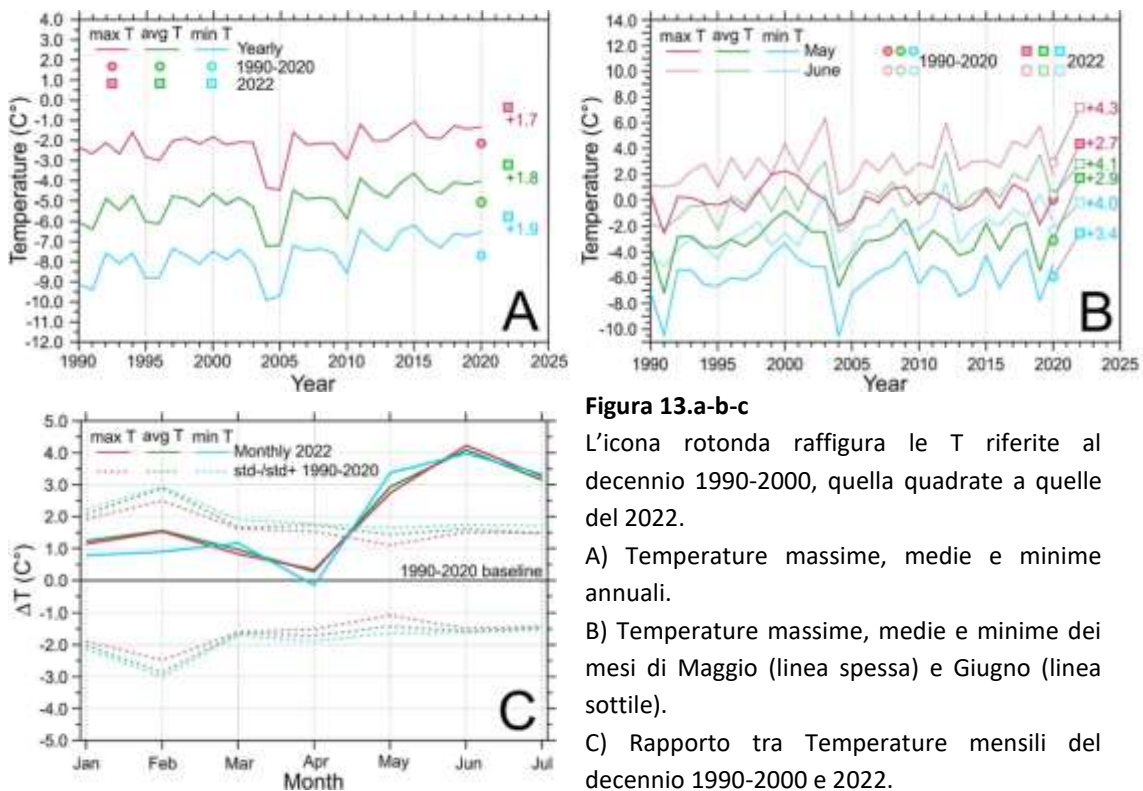
Maggio

- T° Massima media Maggio = 0,1°C (+2,7 °C rispetto Maggio 1990-2000)
- T° Media Maggio = -3,2°C (+2,9°C rispetto Maggio 1990-2000)
- T° minima Maggio = -5,9 °C (+3,4 °C rispetto Maggio 1990-2000)

Giugno

- T° Massima media Giugno = 2,8°C (+4,0 °C rispetto Giugno 1990-2000)
- T° Media Giugno = 0,4°C (+4,1°C rispetto Giugno 1990-2000)
- T° Minima media Giugno = -2,4 °C (+4,3 °C rispetto Giugno 1990-2000)

Queste temperature hanno portato una fusione media di 35mm  $W_{eq}/gg$  (eq = “equivalente di acqua” e qui è associato all’energia di fusione in acqua) a partire da metà maggio, fino a superare i 42mm  $W_{eq}/gg$  al giorno del cedimento.



**Figura 13.a-b-c**

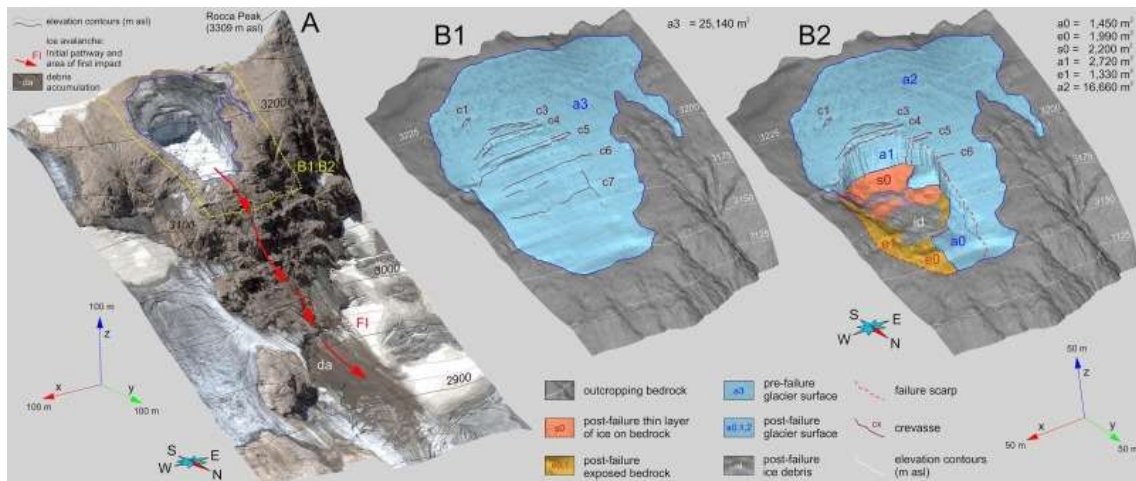
L’icona rotonda raffigura le T riferite al decennio 1990-2000, quella quadrata a quelle del 2022.

A) Temperature massime, medie e minime annuali.

B) Temperature massime, medie e minime dei mesi di Maggio (linea spessa) e Giugno (linea sottile).

C) Rapporto tra Temperature mensili del decennio 1990-2000 e 2022.

In tutti e tre i grafici si possono osservare che le temperature del 2022 sono nettamente superiori a quelle del decennio. (Aldino et al. 2023)



**Figura 14.a-b1-b2**

Ricostruzione 3D digitale della porzione di ghiacciaio crollata. (Aldino et al. 2023)

L'immagine A raffigura la zona dopo il crollo ed il percorso della colata detritica.

Le immagini B1 e B2 mostrano la zona di distacco prima e dopo l'evento.

Si può vedere che il distacco è avvenuto lungo il crepaccio C4.

Il bacino idrografico del crepaccio C4 della figura qui sopra, in cui è avvenuto il distacco, copre un'area di circa 7500 m<sup>2</sup>, con una capacità produttiva di 15000 m<sup>3</sup> di acqua, distribuite nei due mesi precedenti al crollo.

Secondo le stime, i crepacci avevano già raggiunto capacità massima il 20 giugno, con 11000 m<sup>3</sup> di acqua.

Riassumendo, durante l'evento, sono crollati circa 70000 m<sup>3</sup> di materiale, di cui 40000 m<sup>3</sup> di acqua (circa 12-15 mila m<sup>3</sup>) e ghiaccio superficiale, e 30000 m<sup>3</sup> di ghiaccio appartenente a strati inferiori.

### Effetto Albedo sui ghiacciai

L'albedo, inteso come indice di rifrazione, è la frazione di luce che viene riflessa da un corpo o una superficie. Essendo un indice, può andare da 0 (Radiazione totalmente assorbita) a 1 (Radiazione totalmente riflessa) ed è ricavabile dal rapporto tra la quantità di radiazioni corte riflesse con la quantità di radiazioni corte in entrata.

$$Alb = \text{Rad}_{c(\text{ref})} / \text{Rad}_{c(\text{In})}$$

Tipicamente i corpi bianchi hanno albedo molto alti, mentre i corpi scuri albedo basso.

Per i ghiacciai, l'abbassamento di albedo è spesso causato dall'accumulo di polveri sulla superficie.

Queste polveri possono avere origini diverse tra loro:

- Materiale unico derivante dalla decomposizione batterica di materiale organico
- Polveri derivanti dai processi di erosione delle rocce in prossimità dei ghiacciai
- Polveri provenienti da altre zone geografiche, anche molto lontane, trasportate per via eolica dal vento. Molto noto è il fenomeno di polveri del Sahara sulle Alpi (come nel caso del ghiacciaio di Vadret da Morteratsch)

Importante è anche l'accumulo di nerofumo prodotto dalle attività industriali e poi depositato sulle superfici dei ghiacci.

**Figura 15**

Foto Versante del Ghiacciaio di Vadret da Morteratsch. (26 giugno 2003)

Si può notare la zona tra le linee tratteggiate dove la superficie del ghiaccio è ricoperta da uno strato di polveri che ne alterano il colore, e di conseguenza, l'albedo. (Oerlemans; 2009)



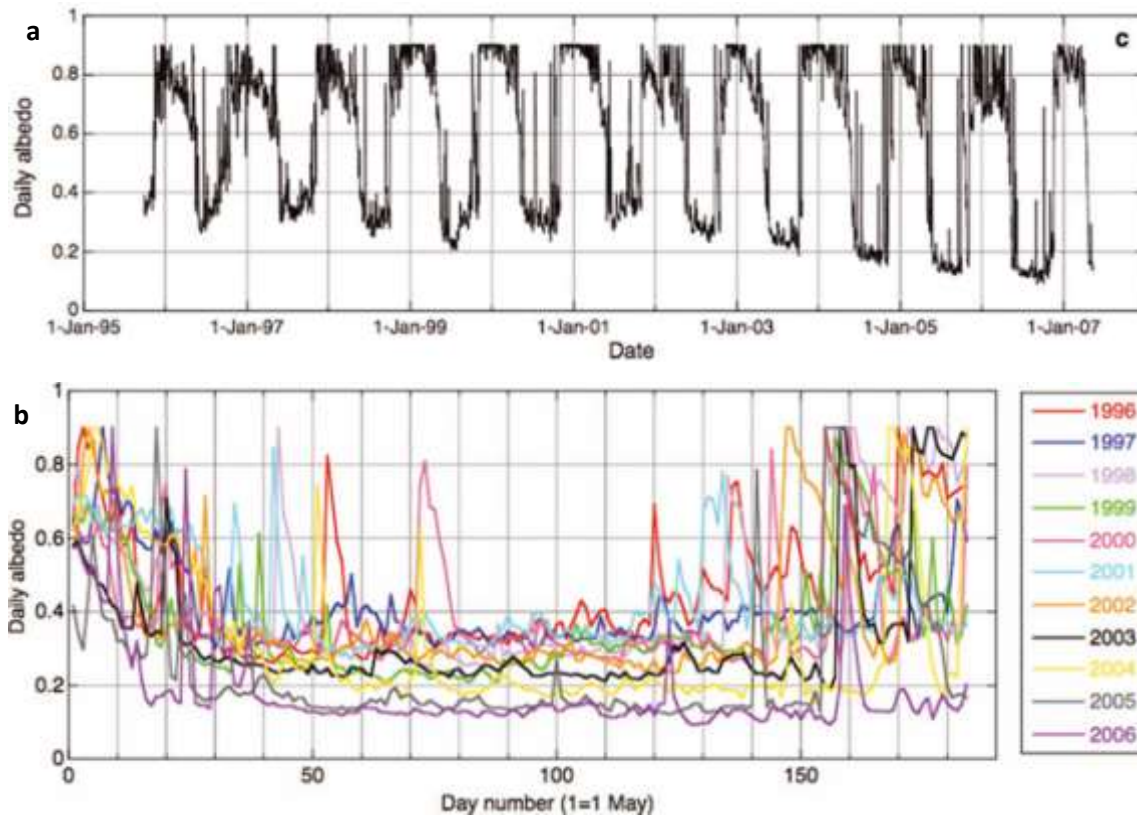
Durante i primi 6 anni (1996-2002), l'albedo estivo aveva valore di 0,3; con alcuni incrementi occasionali fino a 0,8 durante delle nevicate estive.

In alcuni casi, la neve ha coperto la superficie superiore del sensore, lasciando libero quello inferiore, ciò consegue in un irrealmente aumento dei valori di albedo.

Poi con l'estate del 2003, una delle estati più calde degli ultimi decenni, è stato misurato nella stazione AWS del Vadret da Morteratsch una temperatura media di + 5,1°C sopra la norma, durante il periodo di Giugno-Agosto.

Da dopo il 2001, l'albedo ha cominciato a diminuire con ritmo costante, fino a raggiungere un valore di 0,14 nell'estate del 2006 (Giugno-Agosto).



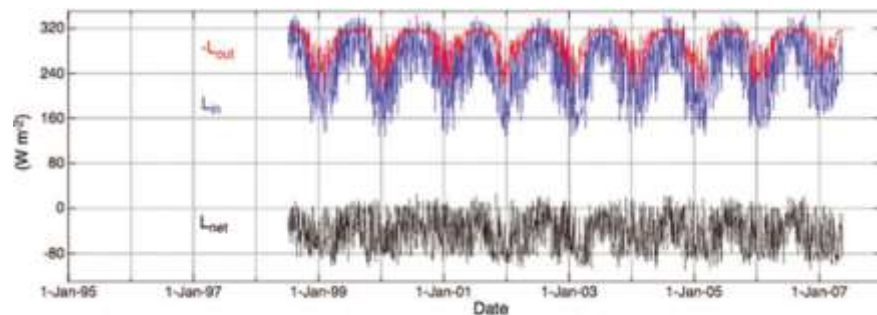


**Figura 16.a-b**

a) Albedo giornaliero con una distribuzione nel complesso durante l'intero periodo 1996-2007.  
 b) Albedo giornaliero diviso per anni distribuito nel periodo di dall'1 Maggio fino al 31 Ottobre di un anno. (Oerlemans; 2009)

**Figura 17**

Grafico con la registrazione delle onde di radiazione solare registrata dal 1995 al 2007 (Oerlemans; 2009)

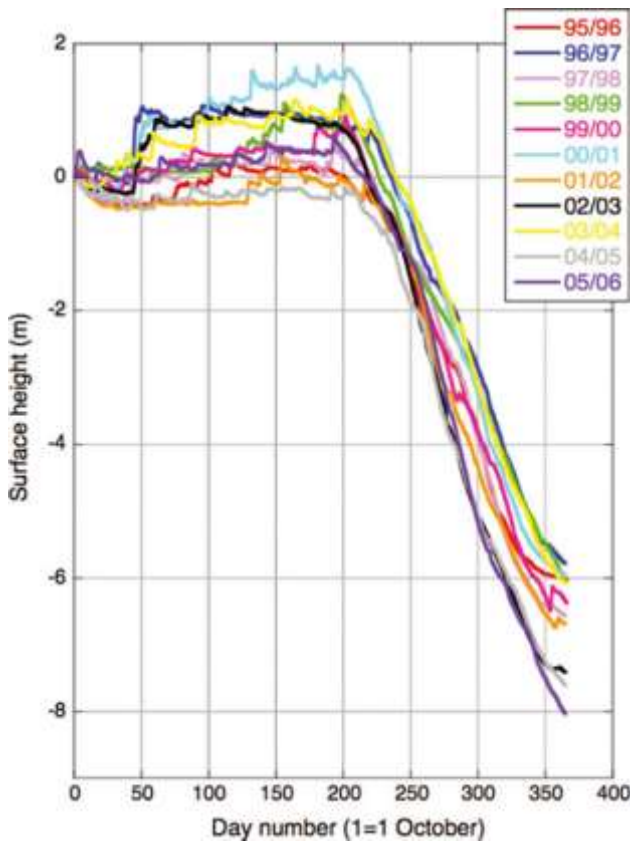


Nella Figura 17 l'output delle onde lunghe ( $L_{out}$ ) dovrebbe mantenersi al di sotto di  $315 W/m^2$ , corrispondente al flusso di una superficie in fusione, ma qui invece è poco superiore ad esso, questo probabilmente per via dell'azione di un flusso d'aria tra la superficie e i 3,5 metri dove è situato il sensore.



Il Sonic Ranger non misura l'altezza assoluta del ghiacciaio, ma bensì ne calcola la variazione nel tempo (in questo caso in un periodo di 364 giorni, per poi resettarsi in data 1 Ottobre dell'anno seguente).

In un periodo che copre 11 anni, è stato calcolato un tasso medio di equilibrio (b) pari a circa -6,3 metri di ghiaccio.



**Figura 18**

Variatione per anno della superficie del ghiacciaio nel corso di 11 anni.

Ogni 1 Ottobre il sonic ranger viene resettato.

(Oerlemans; 2009)

Il bilancio energetico di fusione:

$$E_{\text{fusione}} = S_{\text{in}} + S_{\text{ref}} + L_{\text{in}} + L_{\text{out}} + H_{\text{sen}} + H_{\text{lat}} + G_i$$

Dove:

$S_{\text{in}}$ ,  $S_{\text{ref}}$  = Radiazione solare in entrata e riflessa

$L_{\text{in}}$ ,  $L_{\text{out}}$  = Radiazione ad onde lunghe in entrata ed uscita

$H_{\text{sen}}$ ,  $H_{\text{lat}}$  = Flussi di calore sensibile e latente turbolenti

$G_i$  = flusso di calore sotterraneo

$S_{\text{in}}$ ,  $S_{\text{ref}}$ ,  $L_{\text{in}}$  sono in funzione della Temperatura superficiale  $T_s$ .

$S$  e la  $T_s$  rilevata dal modello risulta maggiore della temperatura di fusione, la  $T_s$  viene riportata a 0, e l'energia rimanente viene utilizzata nel processo di fusione.

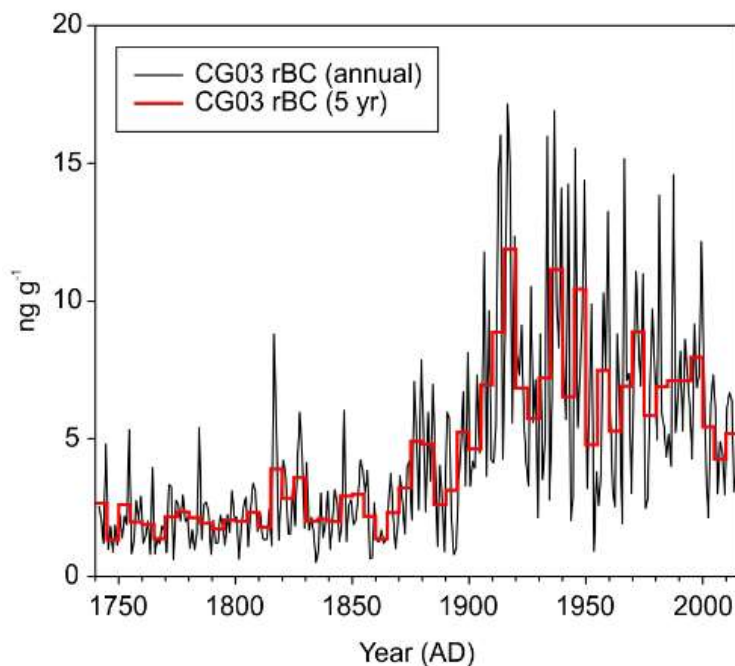
## Depositi di Nero Fumo

I dati combinati dei campioni CG03, CG08 e CG15 hanno permesso a Michael Sigl et al. (2018) di ricreare una registrazione a lungo termine delle deposizioni di BC sul sito da periodi preindustriali fino ai giorni d'oggi.

I valori registrati dal 1975 al 2015 che dimostrano un accumulo  $> 15$  ng/gg, sono tipicamente ottenuti durante i mesi estivi, dove avviene una deposizione maggiore di BC per via dello strato limite planetario che raggiunge un livello più alto di quello del sito di estrazione. Durante i rimanenti periodi dell'anno, l'accumulo di neve avviene in una troposfera libera e con concentrazioni di BC inferiori, fino ad arrivare anche a 0,9 ng/gg.

Utilizzando principalmente i campioni di CG03, si è riusciti ad determinare le concentrazioni medie di BC in diversi periodi temporali.

- Periodo preindustriale 1741 – 1850 = 2 ng/gg
- Periodo 1880 – 1899 = 4 ng/gg
- Periodo 1910 – 1920 = 10 ng/gg
- Periodo 1921 – 1932 = 6 ng/gg (presumibilmente dato dal calo di produzione industriale per via della crisi economica nata dopo la prima guerra mondiale)
- Periodo 1933 – 1945 = 10 ng/gg
- Periodo 1950 – 2000 i valori sono rimasti elevati circa come nel 1933-1945 e per lo più costanti.
- Dal 2000 in poi, i valori sono scesi a circa 5 ng/gg, che è comunque più del doppio rispetto al periodo preindustriale.



**Figura 19**

Concentrazioni di BC sul Colle Gnifetti.

In nero abbiamo le concentrazioni annuali, mentre in rosso quelle riguardanti un periodo di 5 anni.

Utilizzando questo tipo di rappresentazione possiamo osservare sia i picchi annuali dei mesi estivi, mantenendo contemporaneamente una rappresentazione più realistica e comprensibile data dal grafico quinquennale.

(Sigl et al. 2018)

Per analizzare e studiare l'evoluzione dei ghiacciai lungo le Alpi, i soli campioni di CG03 non riescono a rappresentare in modo uniforme l'accumulo di BC, per questo motivo sono stati utilizzati insieme ai dati ottenuti da un altro carotaggio a Fiescherhorn con il campione FH02 ottenuto a 70 km a nord di CG03 nelle Alpi Bernesi (3900 m s.l.m., 46°33'03" N; 08°04'00"E).

Grazie a questi due set di campioni, sarà possibile ricreare in modo più dettagliato l'andamento dei fronti dei ghiacciai.

	pre-industrial (PI) 1840–1860	“Peak coal” 1905–1925	“Peak petroleum” 1960–1980	Present day (PD) 1995–2005
<b>Ice cores [ng g<sup>-1</sup>]</b>				
CG03	2.3	8.4 (+270 %)	6.6 (+190 %)	6.6 (+190 %)
FH02*	9.9	34.8 (+250 %)	21.0 (+110 %)	14.1 (+43 %)
Greenland stack (N = 4)	1.4	5.2 (+270 %)	2.3 (+59 %)	1.8 (+24 %)
<b>Emission inventory (Bond et al., 2007) [Gg yr<sup>-1</sup>]</b>				
OECD Europe	292	793 (+170 %)	653 (+120 %)	352 (+20 %)
Western Alps (45–47° N/6–9° E)	3.2	8.9 (+180 %)	8.0 (+150 %)	5.7 (+79 %)

**Tabella 2**

concentrazioni mediane di BC nei campioni di CG03 e FH02 durante il periodo preindustriale (1840–1860), durante il picco della combustione del carbone (1910–1950), picco di combustione del petrolio (1970–2000) e oggi (PD, 1995–2005); i numeri tra parentesi indicano l'aumento relativo al Periodo preindustriale (in %) (Sigl et al. 2018)

Insieme alla determinazione delle concentrazioni di BC nei campioni CG03 e FH02, sono stati raccolti anche i dati delle lunghezze di alcuni ghiacciai lungo l'arco alpino durante l'emergere della deposizione industriale.

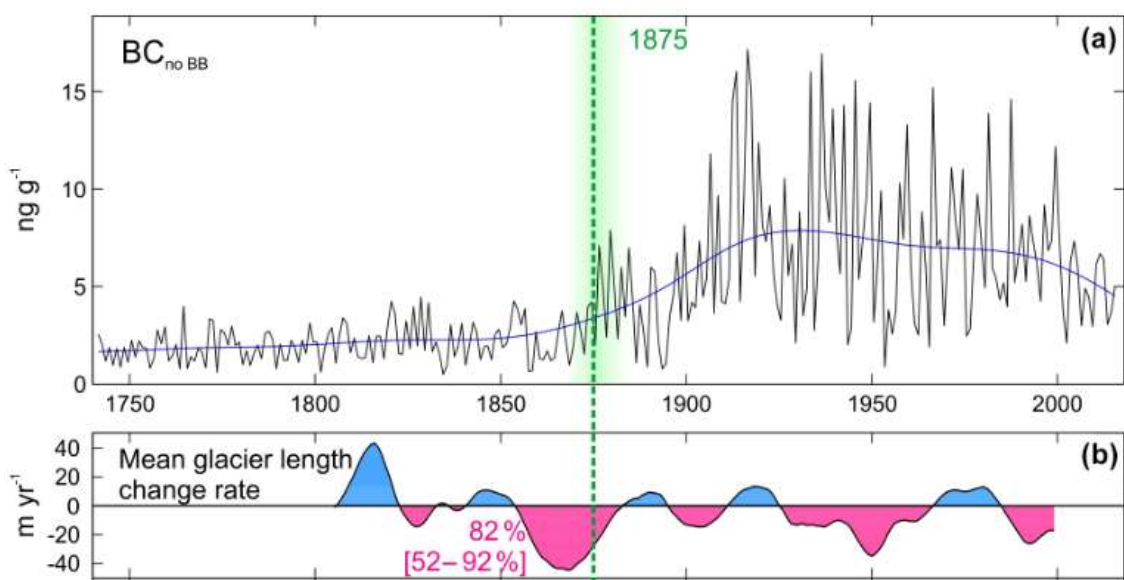
I ghiacciai analizzati sono stati: Bossons e Mer De Glace in Francia, Oberer Grindelwald e Unterer Grindelwald in Svizzera.

La variazione che questi ghiacciai hanno avuto dal 1850 al 1875 (anno definito come inizio della comparsa di BC) è riferito alla variazione dal Fronte Limite Massimo al Fronte Limite Minimo del ghiaccio.

	Time-of-emergence	Total 5 %-95 % range (±5-year dating uncertainty)	Bayesian change-point	Total 5 %-95 % range (±5-year dating uncertainty)
Year	1875	[1868–1884]	1876	[1870–1881]
% of total mid-19th century (i.e. 1850–1880) glacier length reduction completed				
Bossons	100	[78–100]	100	[83–100]
Mer De Glace	79	[37–89]	84	[56–92]
O. Grindelwald	83	[53–89]	87	[62–90]
U. Grindelwald	74	[54–100]	76	[63–94]
Stack ( <i>N</i> = 4)	82	[52–92]	85	[63–91]
Median ( <i>N</i> = 4)	81	[54–94]	86	[62–93]

**Tabella 3**

Lunghezze dei ghiacciai alpini durante l'inizio della deposizione di BC industriale. I dati sono riferiti alle percentuali di variazione di lunghezza. (Sigl et al. 2018)



**Figura 20.a-b**

a) Concentrazione annuale di BC presente nei campioni di CG03. Fino al 1875, BC veniva prodotta senza la combustione di Biomassa (noBB), dopo il 1875 avviene un aumento nella combustione per le attività antropiche.

b) Tasso di variazione media della lunghezza dei quattro ghiacciai (Sigl et al. 2018)

I tassi di riduzione media annua si dimostrano essere maggiori di 40 metri l'anno durante gli anni attorno al 1860, quando i valori di BC seguivano i livelli naturali.

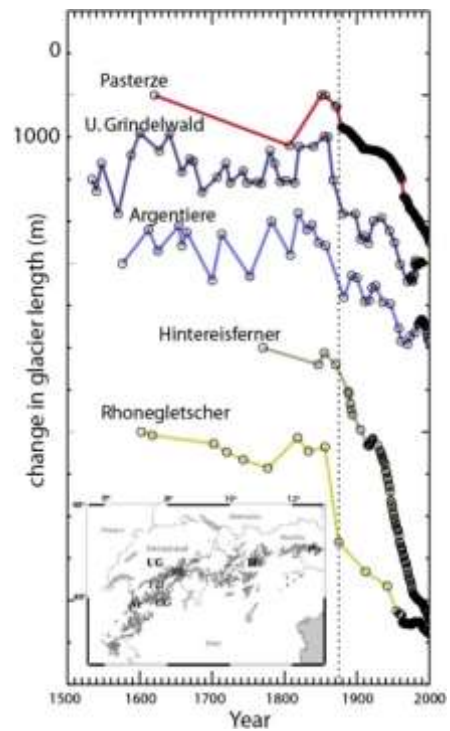
Durante il periodo di emergenza del 1875, ovvero "il tempo medio in cui il segnale di cambiamento emerge dal rumore della variabilità naturale" (Hawkins, E., and Sutton, R. 2012), il ritiro del ghiaccio registrato è stato pari all'83% dell'intero ritiro dei ghiacciai avvenuti durante tutto il 1850.

Un altro studio eseguito da Thomas H. Painter et al. (2013) nelle zone del ghiacciaio d'Argentiere, del Rhonegletscher, dell'Unterer Grindelwaldgletscher, del Pasterzegletscher e dell'Hintereisferner e delle carote di ghiaccio del Fiescherhorn e del Colle Gnifetti, dimostra come l'accumulo di BC abbia portato ad un termine prematuro della Piccola Era Glaciale.

**Figura 21**

Variazione della lunghezza dei ghiacciai degli anni.

Si può vedere un improvviso calo con il coincidere della seconda metà del 1800. (Painter et al. 2013)



Nelle seguenti località, l'accumulo estivo di BC è stato:

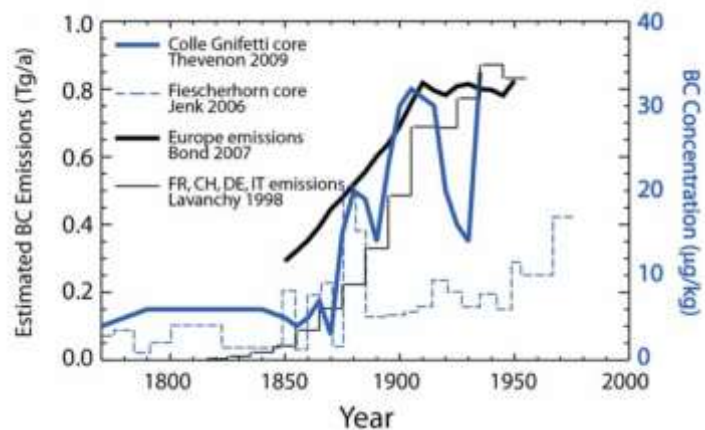
- Colle Gnifetti: prima del 1850 è di 7 µg/kg  
Tra il 1850-1870 è di 14 µg/kg
- Fiescherhorn: 1860-1870 è di 3-4 µg/kg  
1880 è stato registrato di 20 µg/kg  
Tra il 1880 ed il 1920 si è stabilizzato per poi scendere, nel 1980 è salito a 40 µg/kg
- Monte Bianco (Col du Dome 4250 m slm)  
non è mai aumentato fino al 1930, ma nello studio di Painter et al. (2013) non vengono riportate quantità di µg/kg.

**Figura 22**

Concentrazioni di BC nelle carote estratte a Fiescherhorn E Colle Gnifetti.

Sono indicate anche le emissioni europee e quelle di Francia, Svizzera, Germania ed Italia.

(Painter et al. 2013)



Tra gli anni 1990 e 2000, le medie di accumulo vanno da 120 µg/kg a 500 µg/kg a basse altitudini (1800-2600 m slm).

I depositi al di sotto dei 2000 m slm sono più grandi rispetto a quelli sopra i 4000 m slm di 1 o 2 ordini di grandezza.

Questi depositi hanno, come già dimostrato in precedenza, portato ad una variazione dell'albedo.

Fino al ventesimo secolo non vennero mai fatte misurazioni dell'albedo, quindi per i periodi precedenti c'è stato bisogno di fare delle simulazioni derivate dall'aumento delle concentrazioni di BC alla fine del 19esimo secolo. Ciò porta ad una stima dello scioglimento in base alle forzanti radiative di BC. Le anomalie di bilancio di massa vengono poi individuate con il confronto di un modello di ghiacciaio consolidato (in base a temperature e precipitazioni)

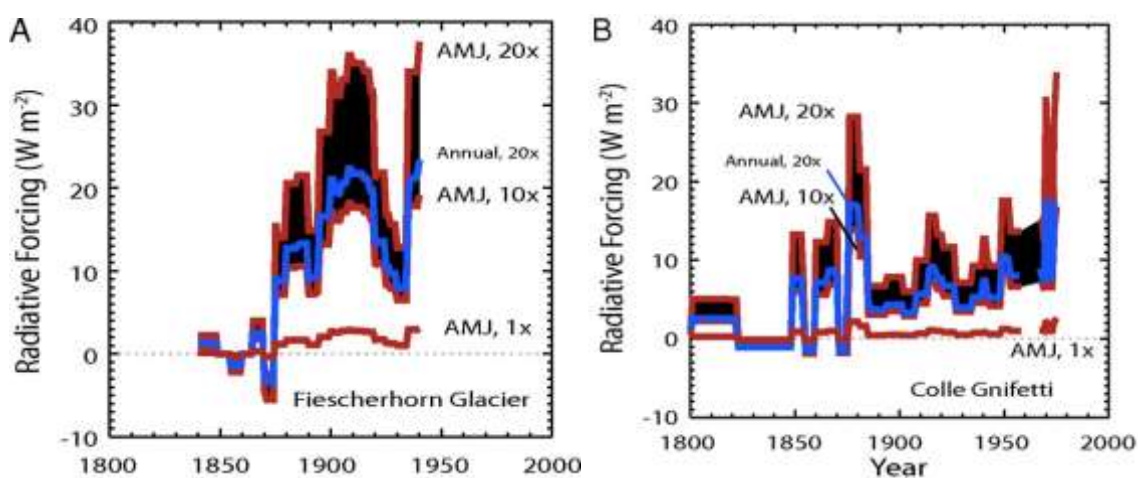
Il Forzante Radiativo Medio (FRM) nelle due principali zone di Colle Gnifetti e Fiescherhorn sono:

- Fiescherhorn :      1880 = 13 W/m<sup>2</sup>  
                              1910-1940 = 22-23 W/m<sup>2</sup>
- Colle Gnifetti :    1880 = 8-17 W/m<sup>2</sup>  
                              1970 = 9-18 W/m<sup>2</sup>

Per quanto riguarda il Forzante Radiativo stagionale nel periodo di Aprile-Maggio-Giugno:

- Colle Gnifetti : 1880 = 14-28 W/m<sup>2</sup>  
1900 = 3-8 W/m<sup>2</sup>  
1970 = 14-33 W/m<sup>2</sup>
- Fiescherhorn : 1900 = 10-20 W/m<sup>2</sup>  
1940 = 19-28 W/m<sup>2</sup>

Ulteriori forzanti potrebbero essere date dal riscaldamento delle rocce fuoriuscite dalla copertura nevosa in fase di scioglimento.



**Figura 23.a-b**

Forzanti radiative nelle zone di ablazione di Fiescherhorn (A) e Colle Gnifetti (B)  
(Painter et al. 2013)

Ottenuti questi dati nelle due sedi, il bilancio di massa sul ghiacciaio simulato risulta essere:

- Fiescherhorn :

Anno	FR AMJ	FR scioglimento	Colonna di neve	Colonna di acqua
1880	10-20 W/m <sup>2</sup>	240-480 Kg/m <sup>2</sup>	0,6-1,2 m	/
Inizio 20°secolo	19-28 W/m <sup>2</sup>	450-890 Kg/m <sup>2</sup>	0,8-1,6 m	0,4-0,9 m

**Tabella 4**

Tabella con forzante radiativa del periodo aprile-giugno, forzante radiativa di scioglimento, colonna di neve sciolta e colonna di neve sciolta equivalente in acqua.

● Colle Gnifetti:

Anno	FR AMJ	FR scioglimento	Colonna di neve	Colonna di acqua
1880	14-28 W/m <sup>2</sup>	330-660 Kg/m <sup>2</sup>	0,8-1,6 m	/
1900	3-8 W/m <sup>2</sup>	70-350 Kg/m <sup>2</sup>	0,2-0,9 m	/
1970	14-33 W/m <sup>2</sup>	330-780 Kg/m <sup>2</sup>	0,8-1,9 m	0,3-0,8 m

Tutto ciò si traduce in una perdita di 15 metri di equivalenti di acqua entro il 1900, e di 30 metri di equivalenti entro il 1930 (-0,5 m/y). Detto ciò, se consideriamo tale variazione di spessore (15-30 m) su di una superficie di 10 Km<sup>2</sup>, otteniamo un ritiro finale di 1,6-3,0 Km.

### I ghiacciai del Massiccio del Monte Bianco

Il Massiccio del Monte Bianco ha una conformazione asimmetrica tra i diversi versanti, con pendii più lievi sul lato nord-est e pendii più aspri in quelli sudorientali.

Queste differenze conformazionali portano anche a delle differenze climatiche e Temperature Medie Annuali dell'Aria (abbreviata a MAAT) tra le diverse località:

- Chamonix (1044 m slm) con un MAAT di +7,2°C (+1,7°C rispetto 1934-2009)
- Courmayeur (1233 m slm) con un MAAT di +10,4°C
- Augille du Midi (3842 m slm) con un MAAT di -8,2°C

Rispetto al 1934-1970, il MAAT è aumentato di 4 volte durante il 1970-2009.

L'aumento non è avvenuto solamente a quote basse, ma anche a quelle superiori: a 4000 m slm, si è calcolato un aumento del +1,4°C del MAAT tra il 1990 ed il 2014.

Tutto ciò influisce anche sulle precipitazioni lungo il Massiccio, ma con pochi cambiamenti:

- A Chamonix la precipitazione annua media è di 1288 mm
- A Courmayeur la precipitazione annua media è di 853 mm



Mentre a 3500 m slm, le precipitazioni sono pari a 3 volte quelle avvenute a Chamonix, con circa 3864 mm.

Ma i cambiamenti più radicali sono stati osservati nei giorni di nevicata, con fusioni più frequenti ed intense. Tra i 1139 m e i 2450 m slm è stata misurata una riduzione della durata del manto nevoso di 8,9 giorni all'anno nel periodo 1970–2015, ovvero un ritardo nell'inizio delle nevicata di 12 giorni ed il loro termine anticipato di 24 giorni.

Dalla Piccola Era Glaciale (LIA) al 2008 è stata osservata una riduzione del 24% della superficie glaciale sul Massiccio.

Sul Ghiacciaio dell'Argentiere lo spessore del ghiaccio si è ridotto di 80 metri tra il 1994 ed il 2013.

La Mer de Glace, dal 1979 al 1994, ha avuto un abbassamento di 1 metro all'anno, per poi ridursi di 4 m/anno dal 2000 al 2008. Nella parte anteriore (1500 m slm) è stato osservato lo scioglimento di 60 metri di ghiaccio tra il 1979 ed il 2003. Ma non è stato solo la superficie a ridursi, bensì anche il fronte si è ritirato di 366 metri nel periodo 1994-2007, con in mezzo un evento di particolare intensità nel 1998-2005 che ha ridotto il fronte di 40 m/a.

Sul Ghiacciaio del Gigante è stata registrata una riduzione dello spessore di 20 metri tra il 1992 ed il 2012.

È stato calcolato da Jacques Mourey et al. (2019) come il ritiro glaciale a quote più alte sia minore di quello a quote più basse. Tra gli anni '60 ed il 2008, sul versante francese del Massiccio del Monte Bianco, la superficie è diminuita del:

- 16% a 2200-2600 m slm
- 11% a 2600-3000 m slm
- 6% a 3000-3500 m slm
- 3% a 3500-4000 m slm

## I ghiacciai del Parco Nazionale dello Stelvio

Nel 2007, è stata misurata (D'Agata, C. et al. 2014) l'area del ghiacciaio Ortles-Cevedale con una ampiezza di 29,29 Km<sup>2</sup> ( $\pm 0,10\%$ ) con una quota minima che varia tra i 2081 e i 2900 m slm. Bisogna considerare però che in questa misurazione sono stati considerati solamente i ghiacciai più grandi di 0,1 Km<sup>2</sup>.

Su quest'area, più del 50% dei ghiacciai ha un'area inferiore ai 0,5 Km<sup>2</sup>, mentre solamente il 13% è maggiore di 1 Km<sup>2</sup>.

La lunghezza media oscilla tra valori di 0,5 e 0,75 Km, e meno del 5% è più lungo di 3 Km.

Detto ciò la correlazione tra la quota minima e l'area del ghiacciaio restituisce un valore  $p = -0,6$ ; ovvero i ghiacciai più grandi tendono a quote minori, mentre ghiacciai più piccoli tendono a quote maggiori.

Cambiamento dei ghiacciai nel periodo 1954 – 2007:

1954 Area= 50,03 Km<sup>2</sup>  $\pm 0,33\%$  (54 Ghiacciai)

1981 Area= 42,84 Km<sup>2</sup>  $\pm 0,38\%$  (56 Ghiacciai)

1990 Area= 38,60 Km<sup>2</sup>  $\pm 0,28\%$  (57 Ghiacciai)

2003 Area= 32,12 Km<sup>2</sup>  $\pm 0,08\%$  (63 Ghiacciai)

2007 Area= 29,29 Km<sup>2</sup>  $\pm 0,10\%$  (67 Ghiacciai) = circa 60% rispetto al 1954

Classe di dimensione (km <sup>2</sup> )	1954-2007		1954-1981		1981-1990		1990-2003		2003-2007	
	% dell'area della classe persa	% dell'area totale persa	% dell'area della classe persa	% dell'area totale persa	% dell'area della classe persa	% dell'area totale persa	% dell'area della classe persa	% dell'area totale persa	% dell'area della classe persa	% dell'area totale persa
<0,1	-61,32	-0,24	-17,65	-0,21	-44,76	-0,72	-0,81	-0,01	-14,27	-0,18
0,1-0,5	-75,23	-20,63	-27,45	-22,35	-26,50	-26,08	-40,68	-18,68	-21,71	-13,19
0,5-1,0	-59,22	-24,39	-22,97	-28,08	-13,98	-21,94	-26,06	-22,33	-16,77	-23,71
1,0-2,0	-44,81	-19,92	-17,81	-23,50	-7,58	-13,70	-21,34	-22,63	-7,65	-14,23
2,0-5,0	-32,14	-20,83	-10,12	-19,48	-6,34	-18,26	-13,80	-23,65	-6,48	-21,35
5,0-10,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>10,0	-19,32	-14,00	-2,97	-6,39	-5,55	-19,30	-6,09	-12,71	-6,26	-27,35

**Tabella 6**

Variazioni della superficie dei ghiacciai dell'Ortles-Cevedale rispetto alla classe areale e alla superficie totale. (D'Agata et al. 2014)

Classe di dimensione (km <sup>2</sup> )	1954-2007	1954-1981	1981-1990	1990-2003	2003-2007
	Perdita annua di superficie (km <sup>2</sup> )	Perdita annua di superficie (km <sup>2</sup> )	Perdita annua di superficie (km <sup>2</sup> )	Perdita annua di superficie (km <sup>2</sup> )	Perdita annua di superficie (km <sup>2</sup> )
<0,1	-0,001	-0,001	-0,003	0,000	-0,001
0,1-0,5	-0,076	-0,054	-0,114	-0,089	-0,091
0,5-1,0	-0,089	-0,068	-0,096	-0,106	-0,164
1,0-2,0	-0,073	-0,057	-0,060	-0,108	-0,099
2,0-5,0	-0,076	-0,047	-0,080	-0,112	-0,148
5,0-10,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
>10,0	-0,051	-0,015	-0,004	-0,060	-0,190
Totale	-0,367	-0,242	-0,436	-0,476	-0,693

**Tabella 7**

Tassi di riduzione annui dei ghiacciai di Ortles e Cevedale, con anche la media delle variazioni superficiali di ogni classe areale nei vari periodi temporali. (D'Agata et al. 2014)

Classe (Km <sup>2</sup> )	Riduzione per Classe	Riduzione rispetto il totale
<0,1	61,3 %	0,2 %
0,1 – 0,5	75,3 %	20,6 %
0,5 – 1,0	59,2 %	24,4 %
1,0 – 2,0	44,8 %	19,9 %

**Tabella 8**

Riduzione totale per ogni classe areale e riduzione areale rispetto all'area totale nel periodo compreso tra 1954 ed il 2007.

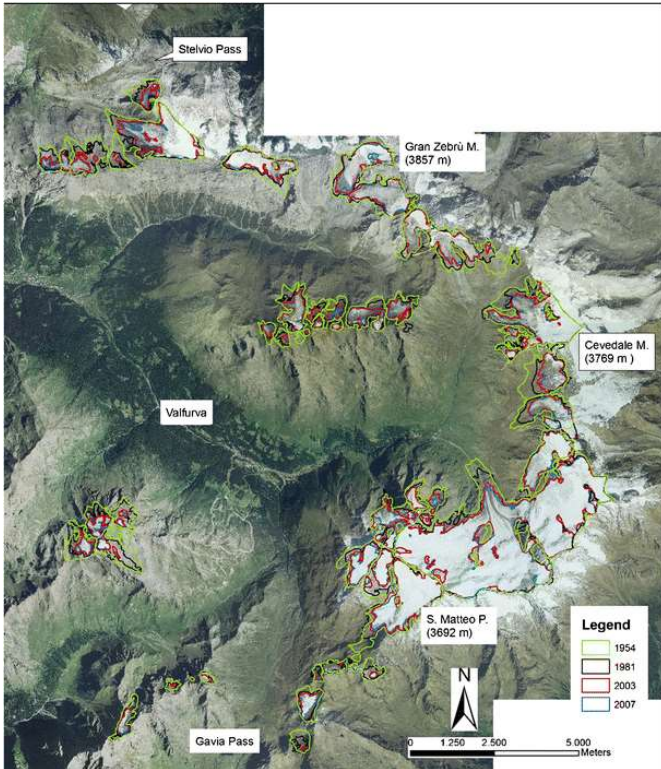
La prima classe areale del <0,1 km<sup>2</sup>, nonostante l'elevata diminuzione, ha contribuito in modo irrisorio alla perdita totale di ghiaccio. Al contrario, la riduzione nelle classi maggiori ha avuto un maggiore impatto sul paesaggio totale.

Infatti la diminuzione della classe <0,1 km<sup>2</sup> in queste zone è stata:

- 1954 – 1981 = 24,76 %
- 1981 – 1990 = 18,80 %
- 1990 – 2003 = 31,16 %
- 2003 – 2007 = 18,25 %

Per le stesse classi, la complessiva perdita negli stessi periodi è stata di 50,43 %; 48,02 %; 41,04 %; 30,90%.

Mentre i ghiacciai più grandi (>2km<sup>2</sup>) hanno avuto una perdita di 2,97 %; 5,55 % ; 6,09 % ; 6,26%.



**Figura 24**

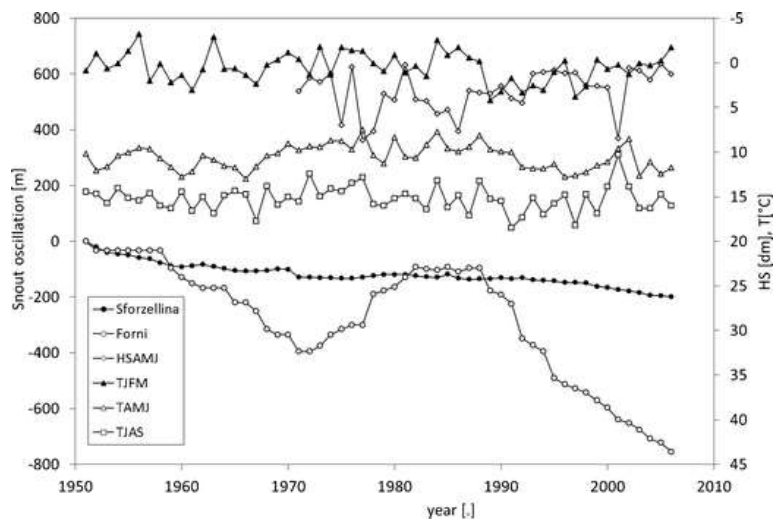
Carta fisica con variazione dei confini dei ghiacciai durante i diversi periodi storici. (D'Agata et al. 2014)

In verde il 1954.

In nero il 1981.

In rosso il 2003.

In blu il 2007.



**Figura 25**

Fluttuazione del fronte nello Sforzellina e nei Forni in base alle variabili metereologiche. (D'Agata et al. 2014)

Le tendenze climatiche locali nell'intero periodo 1951-2007 si dimostrano diverse quando messe in correlazione con le oscillazioni del nord Atlantico ( $\Delta$ NAO) (Tabella 9) e le correlazioni tra fluttuazioni dei limiti dei ghiacciai con le variabili metereologiche (Tabella 10).

Per quanto riguarda la  $\Delta$ NAO, si può affermare che:

- La Temperatura (T) è correlata positivamente ad essa durante tutto l'anno.
- Le Precipitazioni (P) sono sempre correlate negativamente, soprattutto durante i mesi estivi.
- Lo spessore della neve (HS "height snow") è correlato negativamente durante l'inverno, mentre in altri mesi presenta una correlazione né negativa, né positiva.

Test stagionale/variabile	T MK	Coefficiente T LR	T LR pval	PMK	P LR coeff	P LR pval	HS MK	HS LR coef	HS LR pval
Y 1951-1984	0,28	-0,02	0,16	0,15	0,30	0,17	-	-	-
JFM 1951-1984	0,49	-0,02	0,50	0,92	0,26	0,52	-	-	-
AMJ 1951-1984	0,01	-0,07	0,00	0,06	0,67	0,08	-	-	-
JAS 1951-1984	0,63	-0,02	0,36	0,85	0,19	0,71	-	-	-
OND 1951-1984	0,54	0,01	0,73	0,92	0,32	0,80	-	-	-
Y 1981-2007	0,63	0,01	0,65	0,44	-0,18	0,59	-	-	-
JFM 1981-2007	0,98	0,01	0,76	0,33	-0,10	0,77	-	-	-
AMJ 1981-2007	0,00	0,11	0,00	0,06	-1,26	0,04	-	-	-
JAS 1981-2007	0,95	-0,01	0,82	0,72	-0,31	0,64	-	-	-
OND 1981-2007	0,07	-0,07	0,04	0,29	0,89	0,31	-	-	-
Y 1951-2007	0,16	0,01	0,21	0,27	1,05	0,31	0,01	-0,53	0,01
JFM 1951-2007	0,33	0,02	0,14	0,19	-0,15	0,36	0,01	-1,16	0,03
AMJ 1951-2007	0,42	0,01	0,32	0,28	0,14	0,41	0,01	-0,77	0,03
JAS 1951-2007	0,31	0,01	0,55	0,63	0,10	0,66	-	-	-
OND 1951-2007	0,74	0,00	0,82	0,45	0,31	0,22	0,22	-0,18	0,27
Var/stagione	Ty	TJFM	TAMJ	TJAS	TONDO	P	PJFM	PAMJ	-
$\Delta$ NAO 1951-2007	0,28	0,64	0,10	0,23	0,07	0,00	-0,26	-0,12	-
Var/stagione	PIAS	STAGNO	HSY	HSJFM	HSAMJ	HSJAS	HSOND	-	-
$\Delta$ NAO 1951-2007	-0,33	-0,15	0,11	-0,35	-0,03	0,05	-0,12	-	-

**Tabella 9**

Analisi della stazionarietà della temperatura, delle precipitazioni e dell'altezza della neve durante l'anno e durante le stagioni. (D'Agata et al. 2014)

L'analisi della correlazione tra la fluttuazione del limite dei ghiacciai con le variabili meteorologiche dimostra che sullo Sforzellina si ha una correlazione negativa con la temperatura primaverile, mentre sul complesso dei Forni si ha una situazione più complessa: nello stesso anno si ha una correlazione positiva tra lo spostamento del fronte e lo spessore della neve primaverile, ed una correlazione negativa tra lo spostamento frontale e le temperature primaverili, estive ed invernali.

Ghiacciaio/variabile/ritardo	JFM	AMJ	JAS	OND
Sforz/ T /0	-	-0,49	-	-
Forni/ H <sub>s</sub> /0	-	0,33	-	-
Forni/ T /0	-0,39	-0,40	-0,39	-
Forni/ T /-1	-0,44	-	-	-
Forni/ T /-2	-0,52	-	-	-

**Tabella 10**

Coefficiente di correlazione rispetto le variabili meteorologiche (D'Agata et al. 2014)

## **Complesso del Gran Paradiso**

Nel periodo che precede la Piccola Era Glaciale, il ghiacciaio del Gran Paradiso si estendeva per 240 Km<sup>2</sup>, con un volume stimato di circa 17,5 Km<sup>3</sup>. Il complesso all'epoca era formato da 73 Ghiacciai, di cui 17 erano vallivi a bacino composto (in quanto un ghiacciaio è alimentato da più bacini), 27 vallivi a bacino semplice (in quanto un ghiacciaio è alimentato da un solo bacino), 7 vallivi misti e 22 montani. (Carlo Baroni et al. 2021)

I ghiacciai di area maggiore ad 1 Km<sup>2</sup> erano circa il 94% dell'area totale (60% numero totale); di cui 16 hanno area maggiore a 5 km<sup>2</sup> (22% numero totale e 65% area totale); ed infine solamente 4 ghiacciai coprono una superficie maggiore di 10 Km<sup>2</sup> (33% area totale) e si sviluppano tra i 1700 ed i 2300 metri sul livello del mare.

La distribuzione dei ghiacciai si dimostrava essere non omogenea, concentrandosi principalmente sulle zone settentrionali, sia parlando di numeri che di percentuale di copertura.

L'unica eccezione è Valle Orco che era orientata verso sud-est.

- Valnontey ha un margine frontale situato ad una quota di 1680 m slm. I massi erratici su questo ghiacciaio dimostrano che è stata raggiunta questa quota circa 12,4 ± 0,8 ka (migliaia di anni fa)

- Valsavaranche:

- sul Versante Destro è posizionato un masso erratico a 2365 m slm, dimostrando una età di deposizione di 12,1 ± 0,8 ka.

- sul Versante Sud sono presenti 3 campioni, con seguenti tempi di deposizione di: 11,4 ± 0,8 ka ; 10,7 ± 0,6 ka e 9,9 ± 0,7 ka.

- Sul Versante Nord 2 campioni con rispettive età di deposizione di 11,7 ± 0,9 ka e 13,4 ± 0,8 ka.

- sul Versante Sinistro un solo masso errante con 13,8 ± 0,8 ka di età di deposizione.

- Valle di Rhêmes, nella Morena destra di estensione circa 29,2 Km<sup>2</sup>, è presente un masso erratico con età di deposizione di 10,8 ± 0,7 ka.

In conclusione, si può affermare che le morene terminali si sono sviluppate tra le 13 e le 11 migliaia di anni fa, durante i periodi di avanzamento ed arresto dei ghiacciai.

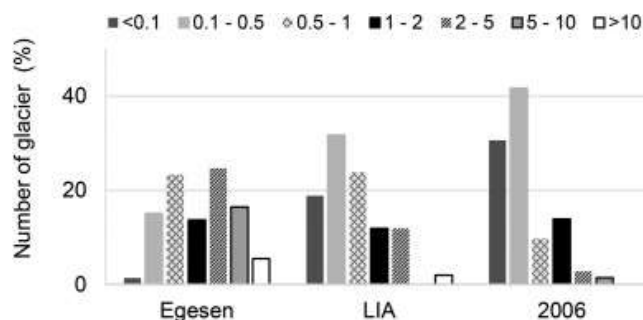
Grazie alla Paleotopografia dell'ultimo stadio Glaciale dell'Egesen, si è riusciti a determinare dei valori ELA compresi tra:

- $2180 \pm 20$  m e  $3270 -10/+20$  m con il metodo AAR
- $2160 -20/+30$  m e  $\pm 3300 \pm 20$  m con il metodo AABR

L'ELA medio ponderato è compreso tra  $2764 \pm 32$  e  $2820 \pm 36$  metri, applicando sempre AAR e AABR.

**Figura 26**

Distribuzione percentuale del numero di ghiacciai durante Egesen, LIA e 2006. Divisi per classe areale. (Baroni et al. 2021)



Durante la Piccola Era Glaciale, sul Gran Paradiso si erano formati ben 101 Ghiacciai con una estensione di  $104 \text{ Km}^2$  ed un volume di acqua pari a  $3,5 \text{ Km}^3$ .

A differenza dei periodi precedenti, le morene sono distribuite uniformemente, con una datazione dell'ultimo avanzamento risalente al 19° secolo.

I ghiacciai vallivi composti sono 8, quelli semplici vallivi sono 48 ( $84 \text{ Km}^2 = 81\%$  superficie totale) e quelli montani sono 45 ( $20 \text{ Km}^2 = 20\%$  superficie totale).

La variazione di ELA ( $\Delta\text{ELA}$ ) tra Egesen e LAI risulta compresa:

- tra  $513 \pm 15$  m e  $392 \pm 13$  m nell'area di Grivola
- tra  $142 \pm 14$  m e  $131 \pm 11$  m nell'area di Valeille

Con una media compresa tra  $280 \pm 13$  m e  $262 \pm 14$  m.

L'estensione massima dei ghiacciai per ogni periodo è stata di:

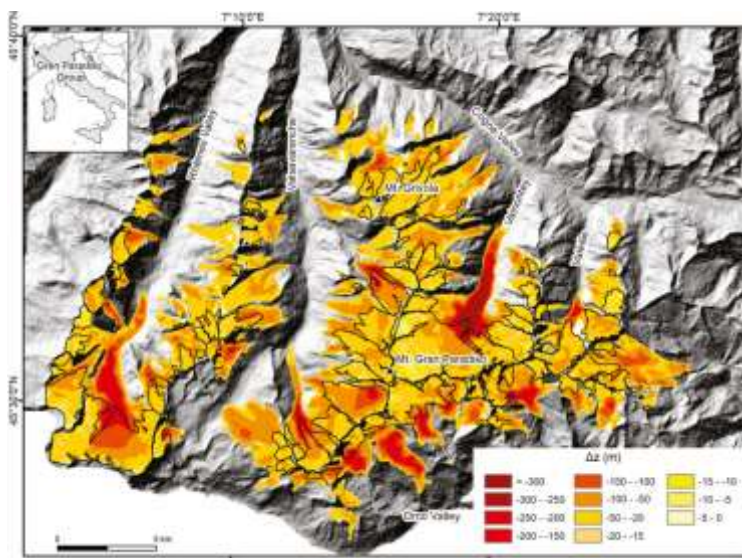
- $240 \text{ Km}^2$  durante Egesen
- $104 \text{ Km}^2$  durante LIA
- $36 \text{ Km}^2$  nel 2006 (15% rispetto ad Egesen)

L'aumento del numero di ghiacciai da 73 (Egesen) a 101 (LIA) indica una frammentazione dei ghiacciai più grandi in corpi più piccoli.

La variazione di estensione avvenuta tra il pleistocene e la piccola Era Glaciale ha portato anche ad una variazione del volume del ghiaccio. Tale differenza è stata calcolata pari a circa 13,5 Km<sup>3</sup>.

Di conseguenza i ghiacciai LIA contengono un quarto (1/4) della quantità di acqua contenuta rispetto ai ghiacciai di Egesen.

Invece tra Lia ed il 2006, I ghiacciai hanno perso circa 3,3 ± 0,3 Km<sup>3</sup>, con un bilancio di massa geodetico di -0,25 m W<sub>eq</sub>/y (W<sub>eq</sub> = “equivalente di acqua”) su di un’area di 70 Km<sup>2</sup>.



**Figura 27**  
Variazione di spessore del ghiaccio tra Egesen e LIA.  
(Baroni et al. 2021)

### LIA e rischi geologici in Trentino

Durante la Piccola Era Glaciale, l’area dei ghiacciai trentini era di 123 Km<sup>2</sup>, con l’Adamello che presentava la superficie più grande di 47,95 km<sup>2</sup> e dall’altra il complesso del Lagorai con la superficie più piccola di 0,24 Km<sup>2</sup>.

**Tabella 11**

Aree dei ghiacciai e dei depositi glaciali nei diversi siti presi in studio.  
(Zanoner et al. 2017)

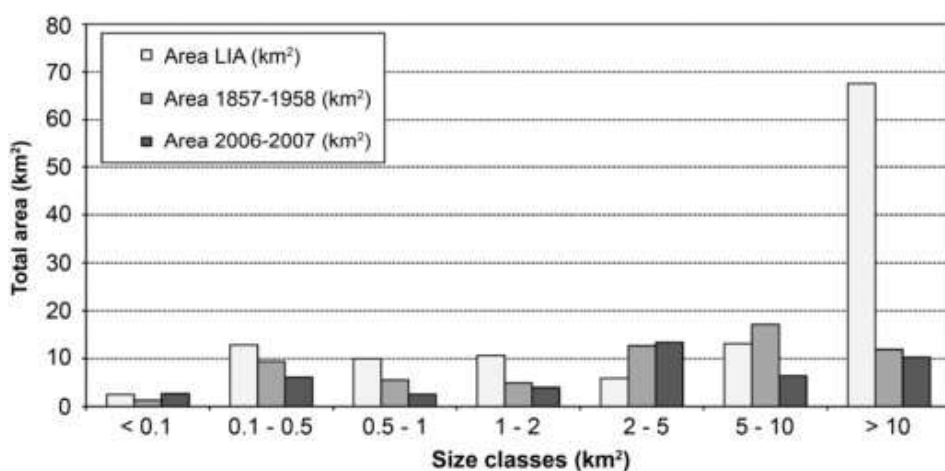
Gruppo montuoso	Area dei ghiacciai LIA (km <sup>2</sup> )	Area dei depositi glaciali LIA e post-LIA (km <sup>2</sup> )
Ortles-Cevedale	32.47	9.65
Adamello	47.95	9.27
Presanella	23.18	7.91
Brenta	7.46	2.22
Lagorai-Cima d’Asta	0.24	0.55
Marmolada	6.43	0.31
Sella Pordoi	0.28	0
Pale di San Martino	4.65	0.13
<b>TOTALE</b>	<b>123</b>	<b>30.04</b>



Tra il periodo dove avviene la massima estensione dei ghiacciai LIA ed il 1957/1958, è stata registrata una perdita di 59,6 Km<sup>2</sup> di superficie ghiacciata, corrispondente ad una perdita dello 0,4%/a.

Invece dal periodo del 1957/1958 fino al 2006/2007, la perdita di superficie è stata di 17,5 Km<sup>2</sup>, una perdita di 0,6%/a, che indica una accelerazione della contrazione dei ghiacciai.

Nel complesso, la perdita totale di superficie ghiacciata tra la LIA ed il 2007 è stata di 77,1 Km<sup>2</sup>, ovvero una perdita del 62,7% rispetto la dimensione originale.



**Figura 28**

Distribuzioni della frequenza delle aree tra i periodi LIA, 1857-1958 e 2006-2007.  
(Zanoner et al. 2017)

Questa percentuale del 62,7% risulta in linea con i dati registrati in altre zone delle alpi italiane:

- Alto Adige = -66% (Zanoner et al. 2017 citano Knoll et al., 2009)
- Piemonte = -63,5% (Zanoner et al. 2017 citano Lucchesi et al., 2014)
- Livigno = -80,1 ± 9,8 % (Zanoner et al. 2017 citano Scotti et al., 2014)

A questi, si aggiungono anche ulteriori dati provenienti dalle alpi europee:

- Europa = -55% tra il 1850-2000 (Zanoner et al. 2017 citano Zemp et al., 2007)
- Pirenei = -67% tra il 1900-2005 (Zanoner et al. 2017 citano Chueca et al., 2005)

La mappatura ha permesso a Zanoner et al. (2017) di identificare i rischi geomorfologici legati ai depositi glaciali della LIA e soprattutto Post-LIA.

I depositi glaciali risultano avere una estensione totale di 30,04 Km<sup>2</sup>, di cui 9,65 Km<sup>2</sup> (32,1%) sono presenti sull'Adamello.

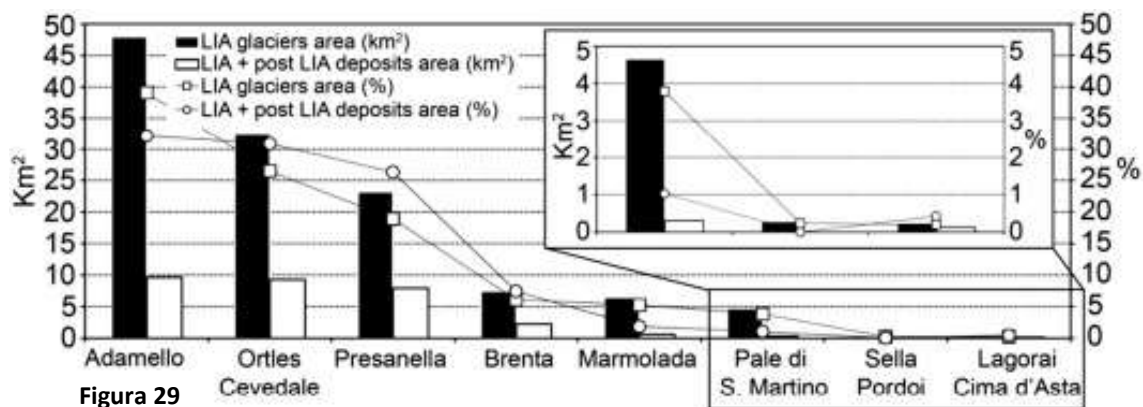
- Presanella-Stavel: dopo la massima estensione olocenica, le morene laterali/frontali della LIA hanno subito dilavamenti, principalmente con colate detritiche. La morena laterale destra presenta numerosi canali di colate ben limitati, ma con comunque eventi estremi di esondazione delle colate, come quella avvenuta nel 1915 e nel 1918 a Presanella ed a Scarpacò.

- Ortles-Cevedale: La parte terminale della morena presente al di sotto di Vedretta Rossa è interessata a colate detritiche ed a erosioni lineari, modificando così il profilo originale.

- Mandrone: La stabilità della morena laterale sinistra è minacciata dalla presenza di un lago alpino di piccole dimensioni, posizionato tra la morena stessa ed il versante. Ciò presenta un problema in quanto, in caso il lago aumentasse di dimensioni, causerebbe una destabilizzazione della morena.

- Nardis e Marmolada: I depositi glaciali sono posizionati tra il ghiacciaio e lo strato sottostante di roccia. Quest'ultimo è stato levigato nel tempo dal ghiacciaio stesso, rischiando così che si verifichino episodi di scivolamento della massa ghiacciata soprastante.

Purtroppo questo evento è già successo sulla Marmolada il giorno 3 Luglio 2022 alle 13:43:20 CEST (11:43:20 UTC).



**Figura 29**

Area e area% dei ghiacciai LIA e dei depositi glaciali LIA e post-LIA di ciascun gruppo montuoso studiato. (Zanoner et al. 2017)

### 3.2 Discussione e Conclusione

Alla fine del Pleistocene, nel periodo risalente a circa 13 mila anni fa denominato "Egesen", possiamo trovare lungo l'arco alpino ghiacciai di grandi dimensioni. Ad esempio di ciò abbiamo visto il complesso del Gran Paradiso, che in quel periodo presentava 73 ghiacciai con una estensione totale di 240 Km<sup>2</sup>.

Dopo il Pleistocene, il periodo che è caratterizzato da una nuova espansione dei ghiacciai è la LIA, durata circa 5 secoli. I ghiacciai durante la Piccola Era Glaciale presentavano un'area di gran lunga inferiore di quella di Egesen, con un numero maggiore di ghiacciai, ma tutti di minori dimensioni. Ciò indica una frammentazione della superficie ghiacciata oltre che ad una sua riduzione. Sempre nel caso del Gran Paradiso abbiamo 101 ghiacciai in 104 Km<sup>2</sup>.

Invece spostandoci in Trentino, i ghiacciai in questo periodo si estendono per 123 Km<sup>2</sup>. La fine di questa era potrebbe essere stata segnata dall'inizio dell'era industriale in Europa.

A prova di ciò possiamo vedere come, con l'inizio di una maggiore deposizione di BC, si ha avuto un grande abbassamento dell'indice di albedo, con un conseguente aumento delle temperature e dello scioglimento dei ghiacci.

Prima dell'epoca industriale, i depositi di BC erano minori, segnati principalmente da eventi occasionali come incendi oppure polveri provenienti da eruzioni vulcaniche. Infatti in questo periodo la concentrazione di BC nel ghiaccio è di 7 µg/Kg (Painter et al. 2013) e 2ng/gg (Sigl et al. 2018) su Colle Gnifetti e sul Fiescherhorn 3-4 µg/Kg (Painter et al. 2013). Da precisare che su Colle Gnifetti sono stati ottenuti dei dati diversi in quanto gli autori degli studi hanno deciso di utilizzare due sistemi di riferimento diversi tra loro.

Subito dopo l'inizio dell'industrializzazione (1850-1870), le quantità di BC sono raddoppiate, raggiungendo su Colle Gnifetti una concentrazione di 14 µg/Kg, su Fiescherhorn ha raggiunto 20 µg/Kg nel 1880.

Solamente a causa della deposizione di smog, si stima che nel 1880 Fiescherhorn abbia subito un abbassamento della colonna di neve fino a 1,2 metri e Colle Gnifetti fino a 1,8 m.

Se prendiamo questi due casi come degli esempi generali, e non come delle singolarità, possiamo dedurre che anche altre variazioni dei ghiacciai sulle alpi italiane siano causate dagli stessi fenomeni.

Se ci aggiungiamo anche l'aumento delle temperature che si registrano ancora oggi dall'inizio dell'era industriale, lo scioglimento dei ghiacci ha portato ad una riduzione vertiginosa delle superfici ghiacciate.

In Trentino, tra il 1850 ed il 1970, è avvenuta una riduzione del 35% dell'area dei ghiacciai, con un tasso di riduzione fino al 1958 registrato di -0,4%/anno.

Tra la LIA ed il 2007, la riduzione totale della superficie ghiacciata in Italia è stata di più del 60% (Zanoner et al. 2017). Questa percentuale corrisponde ad altri dati raccolti in Europa e nei Pirenei (Zemp et al., 2007 e Chueca et al., 2005)

Sul ghiacciaio del Gran Paradiso, dalla LIA al 2006, sono rimasti solo 36 Km<sup>2</sup>, con una perdita di 68 Km<sup>2</sup>.

Invece sul massiccio del Monte Bianco, tra la LIA ed il 2008 si ha avuto una riduzione della superficie del 24% (Mourey et al. 2019). Questa riduzione minore rispetto il paesaggio europeo si potrebbe attribuire all'altitudine dei ghiacciai. Infatti nello stesso articolo di Mourey et al. (2019) viene mostrato come le riduzioni di superficie siano minori all'aumentare della quota.

Spostandoci sul gruppo dell'Ortles-Cevedale, si è passati da un'area di 50,03 Km<sup>2</sup> nel 1954 a 29,29 Km<sup>2</sup> nel 2007, ovvero il 60% delle dimensioni iniziali.

Tutti questi ghiacciai che si ritirano, o in alcuni casi peggiori, scompaiono, possono portare a delle fragilità ed instabilità nelle strutture dei ghiacciai stessi e dei versanti su cui giacciono.

Secondo lo studio di Zanoner et al. (2017) alcuni dei ghiacciai in Trentino sono a rischio di cedimenti. Per esempio sul Mandrone, l'aumento delle dimensioni di un lago alpino potrebbe compromettere la stabilità della morena laterale.

Sfortunatamente, alcuni degli eventi previsti si sono verificati recentemente, come l'incidente sulla Marmolada il giorno 3 Luglio 2022, dove circa 70 mila tonnellate di acqua, ghiaccio e roccia si sono distaccati dalla montagna, causando 11 morti e 7 feriti (Bondesan et al. 2023).

Questo potrebbe essere solo l'inizio di una serie di eventi simili.



## BIBLIOGRAFIA

- Aldino Bondesan, Roberto G. Francese, The climate-driven disaster of the Marmolada Glacier (Italy), *Geomorphology*, Volume 431, 2023, 108687, ISSN 0169-555X
- A. John, P.C. Reid, North Atlantic Oscillation in *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition)*, 2001
- Behringer, W. Climatic Change and Witch-hunting: the Impact of the Little Ice Age on Mentalities. *Climatic Change* 43, 335–351 (1999).  
<https://doi.org/10.1023/A:1005554519604>
- Carlo Baroni, Simona Gennaro, Maria Cristina Salvatore, Susan Ivy-Ochs, Marcus Christl, Riccardo Cerrato, Giuseppe Orombelli, Last Lateglacial glacier advance in the Gran Paradiso Group reveals relatively drier climatic conditions established in the Western Alps since at least the Younger Dryas, *Quaternary Science Reviews*, Volume 255, 2021, 106815, ISSN 0277-3791, doi:10.1016/2021.106815
- D'Agata, C., Bocchiola, D., Maragno, D. et al. Glacier shrinkage driven by climate change during half a century (1954–2007) in the Ortles-Cevedale group (Stelvio National Park, Lombardy, Italian Alps). *Theor Appl Climatol* 116, 169–190 (2014).  
doi:10.1007/s00704-013-0938-5
- Hawkins, E., and Sutton, R. (2012), Time of emergence of climate signals, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01702, doi:10.1029/2011GL050087.
- I. Santin, R.R. Colucci, M. Žebre, M. Pavan, A. Cagnati, E. Forte, Recent evolution of Marmolada glacier (Dolomites, Italy) by means of ground and airborne GPR surveys, *Remote Sensing of Environment*, Volume 235, 2019, 111442, ISSN 0034-4257
- Jacques Mourey, Mélanie Marcuzzi, Ludovic Ravanel & François Pallandre (2019) Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51:1, 176-189, DOI: 10.1080/15230430.2019.1612216
- John D. Castello, Scott O. Rogers - Princeton University Press, 10 apr 2005

- Michael Sigl, Nerilie J. Abram, Jacopo Gabrieli, Theo M. Jenk, Dimitri Osmont, and Margit Schwikowski (2018) 19th century glacier retreat in the Alps preceded the emergence of industrial black carbon deposition on high-alpine glaciers. *The Cryosphere* Volume 12, issue 10 TC, 12, 3311–3331, 2018
- Mike Lockwood, Mat Owens, Ed Hawkins, Gareth S Jones, Ilya Usoskin, Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age, *Astronomy & Geophysics*, Volume 58, Issue 2, 1 April 2017, Pages 2.17–2.23, <https://doi.org/10.1093/astrogeo/atx057>
- NCCS – Effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico - 2021  
<https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/settori/gestione-delle-acque/effetti-dei-cambiamenti-climatici-sul-regime-idrico/neve-e-ghiacciai.html#contact>
- Neukom R, Barboza LA, Erb MP, Shi F, Emile-Geay J, Evans MN, Franke J, Kaufman DS, Lücke L, Rehfeld K, Schurer A, Zhu F, Brönnimann S, Hakim GJ, Henley BJ, Ljungqvist FC, McKay N, Valler V, von Gunten L. Consistent multi-decadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat Geosci.* 2019 Jun 12;12(8):643-649. doi: 10.1038/s41561-019-0400-0. Epub 2019 Jul 24. PMID: 31372180; PMCID: PMC6675609.
- Oerlemans, J., Giesen, R., & Van Den Broeke, M. (2009). Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland) *Journal of Glaciology*, 55(192), 729-736. doi:10.3189/002214309789470969
- Schwikowski, M., Eichler, A. (2010). Alpine Glaciers as Archives of Atmospheric Deposition. In: Bundi, U. (eds) *Alpine Waters. The Handbook of Environmental Chemistry()*, vol 6. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88275-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88275-6_7)
- Smith, SJ, Chateau, J., Dorheim, K. et al. Impatto della mitigazione del metano e del black carbon su forzante e temperatura: un'analisi di scenari multi-modello. *Cambiamento climatico* 163 , 1427–1442 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02794-3>



Thomas H. Painter, Mark G. Flanner, Georg Kaser, Ben Marzeion, Richard A. VanCuren, and Waleed Abdalati (2013) End of the Little Ice Age in the Alps forced by industrial black carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 15216-15221 110 38 doi:10.1073/pnas.1302570110 <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1302570110>

Thomas Zanoner, Alberto Carton, Roberto Seppi, Luca Carturan, Carlo Baroni, Maria Cristina Salvatore, Matteo Zumiani, Little Ice Age mapping as a tool for identifying hazard in the paraglacial environment: The case study of Trentino (Eastern Italian Alps), *Geomorphology*, Volume 295, 2017, Pages 551-562, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.014>.